

JOÃO AMOS DE TOLEDO CULLEN

Eng. Mecânico, Fundação Armando Álvares Penteado, 1980

UM PROCEDIMENTO PARA A ESPECIFICAÇÃO DE MATERIAIS
DE REFORÇO PARA PISTÕES DE ALUMÍNIO

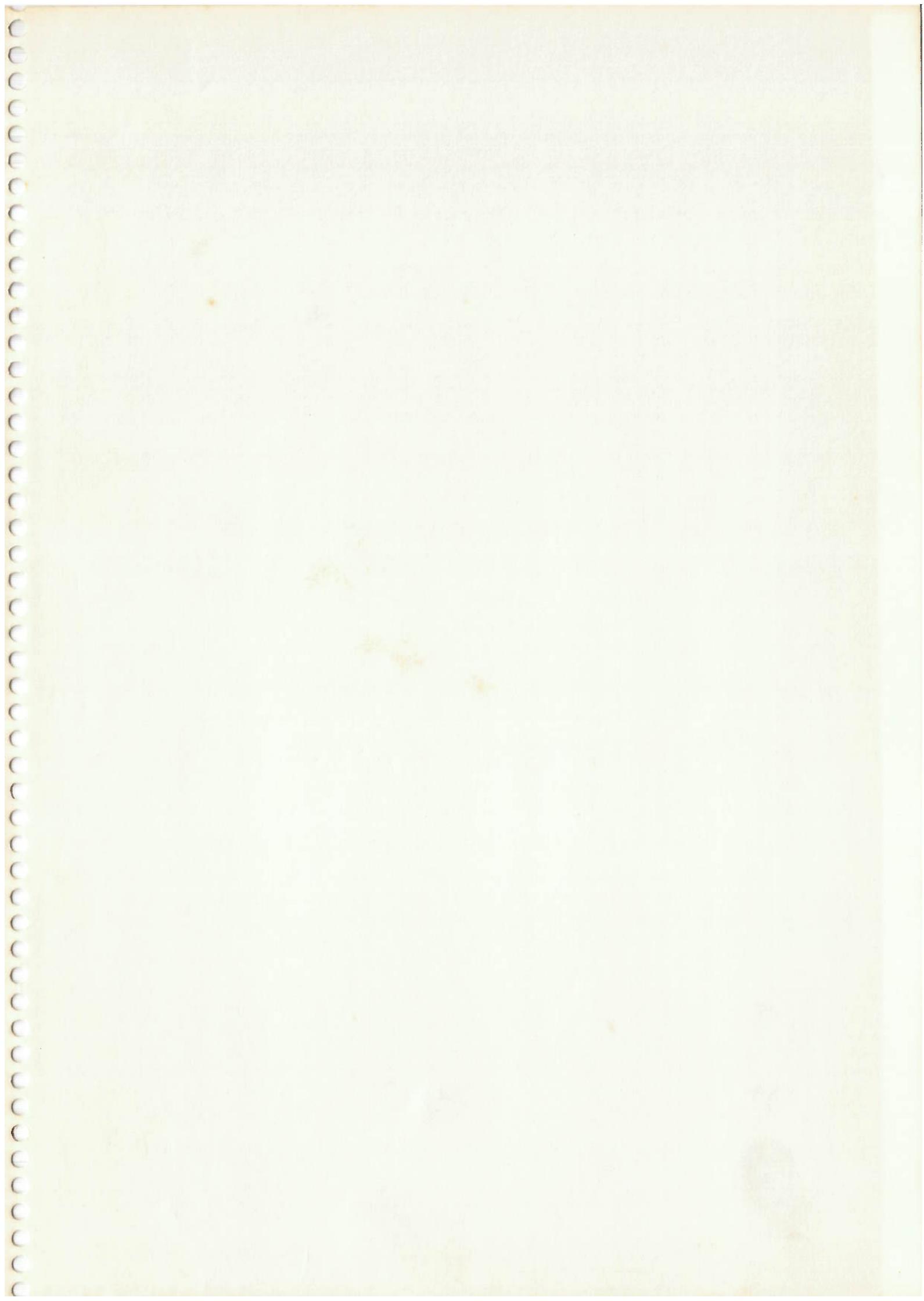
Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da USP para a obten-
ção do título de Mestre em Enge-
nharia Naval.

Orientador: Prof.Dr. Edison Gonçalves, Depto. Eng. Naval

São Paulo, 1989

188-1023

FD.1023



Aos meus pais

JOÃO e RACHEL

À minha esposa

SILVANA

AGRADECIMENTOS

À Metal Leve S.A. Ind. e Com. pela oportunidade, apoio e recursos indispensáveis para a elaboração deste trabalho.

Aos Sr. Alexandre Afonso pelo auxílio na compreensão dos materiais cerâmicos.

Ao meu professor e orientador Dr. Edison Gonçalves pela sua infinita paciência e dedicação.

RESUMO

Este trabalho propõe um procedimento para a especificação de materiais de reforço estrutural para pistões de alumínio utilizados em motores de combustão interna.

Após uma breve introdução ao problema de trincas na borda da câmara de combustão de pistões o procedimento é apresentado. Nele são discutidos a pré-seleção dos materiais, o levantamento de suas propriedades mecânicas e físicas, a definição da geometria do anel de reforço e a avaliação no motor em testes de durabilidade. A seguir, o procedimento é aplicado com bons resultados no desenvolvimento de um pistão para motor ciclo Diesel multicilíndrico.

ABSTRACT

A procedure to specify reinforcement materials for aluminum pistons of internal combustion engines is proposed on this work.

After a brief introduction to the problem of cracks at the combustion bowl rim, this study focuses the material selection criteria, the physical and mechanical properties acquisition, the design of the reinforced insert and its evaluation on engine. Following, this procedure is applied with success on the development of a piston for a multicylinder Diesel engine.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 Aspectos Gerais	1
1.2 Breve Revisão Bibliográfica	3
1.3 Escopo do Trabalho	8
2 - PROCEDIMENTO PROPOSTO PARA A ESPECIFICAÇÃO DE MATERIAIS DE REFORÇO	9
2.1 Considerações Gerais	9
2.2 Procedimento	9
3 - APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO	15
3.1 Introdução	15
3.2 Pré-Seleção dos Materiais (1ª Etapa)	15
3.3 Levantamento das Propriedades dos Materiais (2ª Etapa) ..	17
3.4 Avaliação Estrutural Preliminar (3ª Etapa)	18
3.4.1 Introdução	18
3.4.2 Distribuição de Temperaturas e de Tensões Térmicas no Pistão	19
3.4.3 Estimativa das Tensões Mecânicas na Borda da Câmara	27
3.5 Avaliação Preliminar em Motor Monocilíndrico (4ª Etapa) ..	27
3.6 Avaliação Final do Inserto no Motor de Interesse (5ª Etapa)	30
3.6.1 Introdução	30
3.6.2 Definição da Geometria do Inserto	30
3.6.3 Avaliação da Resistência Estrutural em Motor	38
4 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	45
4.1 Conclusões	45
4.2 Recomendações	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

LISTA DE FIGURAS

Nº DA FIGURA	DESCRIÇÃO	PÁGINA
1.1	Aspecto típico de trincas térmicas na borda de câmara de combustão	2
1.2	Aspecto típico de trinca mecânica na borda da câmara, direção do furo para pino	2
1.3	Influência de configuração da câmara de combustão de um pistão no nível de particulados e de óxidos de nitrogênio	4
3.1	Dimensões dos insertos e da câmara de combustão no pistão de diâmetro 92 mm	20
3.2	Malha de elementos finitos e condições de contorno para o pistão de diâmetro 92 mm ..	21
3.3a,b	Dimensões dos templugs M3 e M1,6	24
3.4	Temperaturas obtidas com auxílio de templugs M1.6 com o pistão operando em um motor fornecendo uma potência de 8,6 kW a 2400 rpm (°C)	25
3.5	Localização dos extensômetros elétricos utilizados na determinação das deformações sob carregamento mecânico e das tensões residuais	26
3.6	Ilustração da câmara de testes dinâmicos do pulsador hidráulico	28
3.7	Estrutura do MRM após 129 hs de teste em motor (55X), o detalhe mostra a presença de compostos intermetálicos Al-Fe (480X)	29
3.8	Configuração do pistão e da câmara de com-	

Nº DA FIGURA	DESCRIÇÃO	PÁGINA
	bustão tipo reentrante para atender o nível aceitável de emissões para 1991, diâmetro do pistão: 112 mm	31
3.9	Condições de contorno e distribuição de temperaturas no pistão obtidas com auxílio de elementos finitos 2D	32
3.10	Tensões térmicas tangenciais e equivalentes na borda da câmara de combustão com várias configurações de insertos de MRM e CRM, calculadas através do método de elementos finitos	33
3.11	Tensões mecânicas na borda de câmara devido a carga do gás	34
3.12	Tensões tangenciais residuais em um pistão com inserto de CRM	37
3.13	Trincas no pistão de alumínio sem reforço verificada entre 430 hs e 550 hs de teste em motor 55/5	39
3.14	Distribuição de temperaturas no pistão na condição de potência máxima obtidas com auxílio de templugns	41
3.15	Trincas no inserto de CRM após 1063 hs de teste em motor	42
3.16	Alinhamento do topo do pistão com inserto de FRM e CRM após 2000 hs de teste em motor	43

LISTA DE TABELAS

TABELA Nº	DESCRIÇÃO	PÁGINA
3.1	Propriedades físicas e mecânicas dos materiais analisados	18
3.2	Resumo dos resultados obtidos com o pistão sem inserto e com os vários insertos propostos	22
3.3	Tensões tangenciais calculadas e medidas na borda da câmara	36
3.4	Resultados de tensões residuais medidas em pistões com inserto de CRM após 502 hs de teste em motor e em um pistão semelhante sem uso	40
3.5	Resumo dos resultados de testes em motor conforme procedimento 55/5 , pistão de diâmetro 112 mm	44

1 - INTRODUÇÃO

1.1 Aspectos Gerais

O aumento constante da potência dos motores de combustão interna, associado a necessidade de redução da relação potência/peso do motor, da emissão de poluentes e do consumo de combustível é responsável por um considerável aumento das solicitações termo-mecânicas dos pistões.

Essas solicitações são resultantes de uma combinação de tensões térmicas que se modificam conforme o regime de operação do motor e de tensões mecânicas cíclicas oriundas da pressão decorrente da explosão da mistura ar-combustível no interior da câmara de combustão do motor. Motores pesados ciclo Diesel como por exemplo, os de aplicação marítima, os de aplicação automotiva para transporte de cargas pesadas ou de grupos geradores, são bastante vulneráveis a essas solicitações que frequentemente ocasionam trincas na região do topo do pistão, particularmente na borda da câmara de combustão. Quando as tensões térmicas, sempre compressivas na borda da câmara, são preponderantes, as trincas surgem sem direção preferencial, conforme mostra a Figura 1.1. Estas trincas, ditas térmicas, ocorrem devido ao escoamento do material a quente sob compressão, e a nucleação se processa devido ao aparecimento de tensões residuais trativas quando o pistão tende a voltar a sua forma original com a diminuição da temperatura do pistão em condições mais suaves de operação do motor.

As trincas ditas mecânicas, Figura 1.2, ocorrem devido às elevadas tensões cíclicas de tração decorrentes da pressão dos gases de combustão. São radiais e surgem preferencialmente alinhadas ao eixo do furo para pino do pistão.

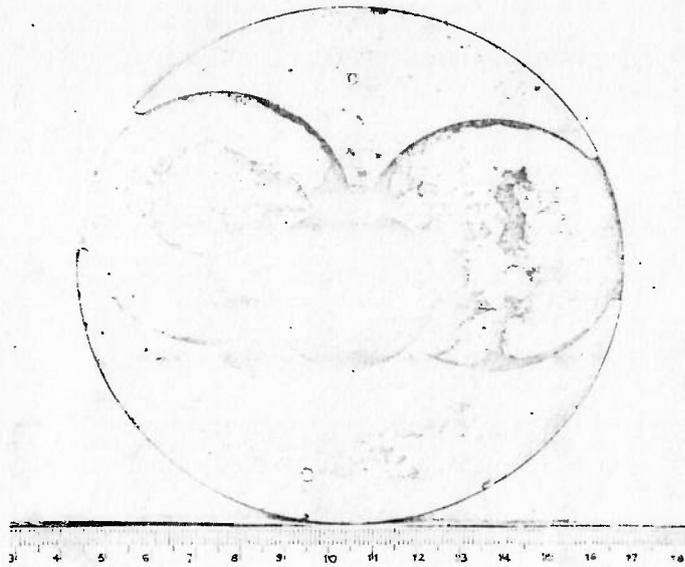


Figura 1.1 Aspecto típico de trincas térmicas na borda da câmara de combustão.

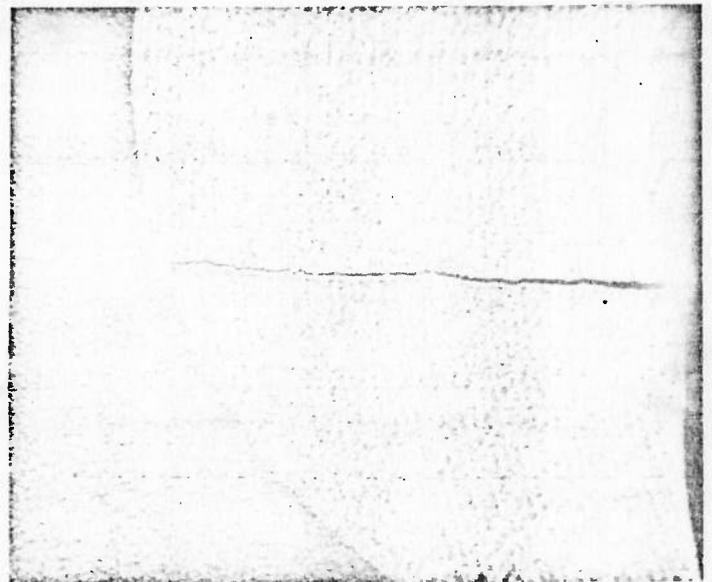


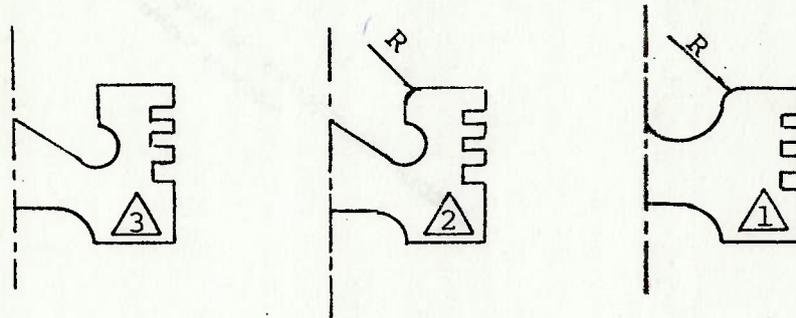
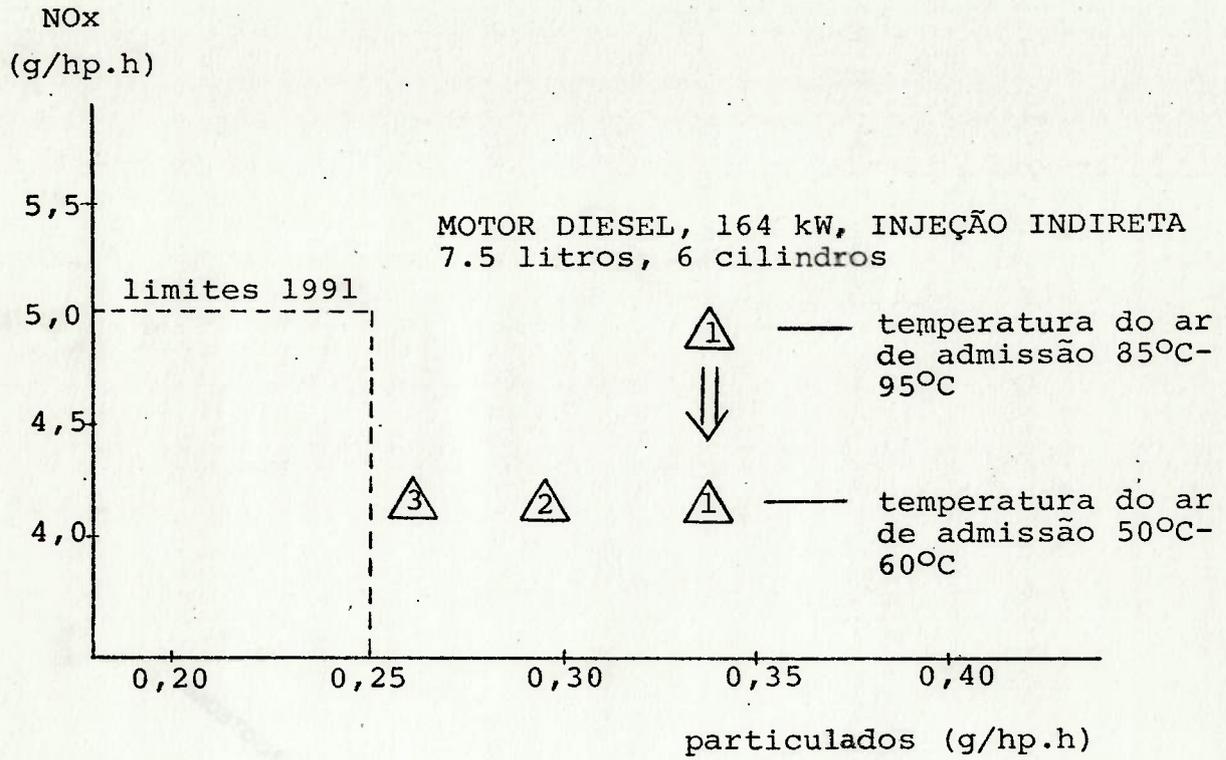
Figura 1.2 Aspecto típico de trinca mecânica na borda da câmara, direção do furo para pino.. O detalhe mostra a trinca da esquerda com um aumento de 8X.

A introdução de uma curvatura na borda da câmara diminui a concentração de tensões nessa região, aumentando consideravelmente a resistência à ocorrência de trincas. Entretanto, a presença dessa curvatura prejudica o processo de combustão da mistura ar-combustível, aumentando a emissão de poluentes atmosféricos. A Figura 1.3 extraída da referência [1], apresenta valores de emissões de particulados e de óxidos de nitrogênio para três geometrias diferentes de câmara de combustão podendo-se constatar que as bordas de câmara com curvatura apresentam índices de emissão de particulados maiores. Várias são as alternativas para se evitar o aparecimento de trincas em pistões, indo desde otimizações estruturais do pistão e/ou pino, até tratamentos superficiais que elevam a vida do pistão a níveis não muito significativos.

1.2 Breve Revisão Bibliográfica

As solicitações termo-mecânicas no topo de um pistão foram estudadas por MORGAN [2] que as classificou em quatro diferentes tipos:

- i) Tensões térmicas devido ao gradiente térmico no pistão em regime permanente - As temperaturas mais elevadas próximo ao topo do pistão causam uma dilatação maior desta região em relação às regiões mais frias com conseqüente aparecimento de tensões.
- ii) Tensões térmicas transientes devido às mudanças de carga no motor - Quando as condições de operação do motor passam de marcha lenta para potência máxima, por exemplo, a temperatura do pistão bem como sua distribuição mudam significativamente, com conseqüente alteração na distribuição de tensões.



câmara reentrante sem raio na borda

câmara reentrante com raio na borda

câmara aberta com raio na borda.

Figura 1.3 Influência da configuração da câmara de combustão de um pistão no nível de particulados e de óxidos de nitrogênio.

- iii) Tensões térmicas cíclicas que ocorrem num ciclo completo - Baixas temperaturas durante o ciclo de admissão e compressão, e altas temperaturas durante o ciclo de explosão e escape provocam uma flutuação de temperatura na superfície do topo do pistão com efeitos semelhantes a i, porém com frequência mais elevada.
- iv) Tensões mecânicas devido à carga do gás de combustão no topo do pistão - São decorrentes das deformações da biela, pino e pistão quando atua a pressão do gás.

MORGAN [2] no mesmo trabalho discute cinco diferentes tipos de falhas na borda da câmara de combustão do pistão em operação no motor, que são as seguintes:

- i) A falha ocorre quando as tensões elásticas excedem valores máximos admissíveis indicados na curva de resistência à fadiga do material na temperatura de operação - fadiga de alto ciclo. As tensões médias e alternadas utilizadas na análise são decorrentes de uma combinação das tensões devido ao gradiente térmico e das tensões devido a carga do gás.
- ii) A falha ocorre devido à relaxação das tensões médias compressivas - fadiga de alto ciclo. É uma variação da falha apresentada no item i, onde se assume que a tensão média compressiva desaparece na temperatura de operação, atuando apenas a componente de tensão alternada. Esta condição é crítica quando a tensão média compressiva atenua o efeito das tensões traativas alternadas.
- iii) A falha ocorre quando as tensões residuais de tração excedem o limite de resistência do material - falha estática. Se as tensões compressivas em operação excederem o limite elástico

do material ou ocorrer fluência, esta deformação permanente origina as tensões residuais trativas quando cessa o carregamento.

- iv) A falha ocorre devido às deformações progressivas (Thermal Ratcheting) - falha estática. A falha ocorre quando o limite elástico é excedido em parte da estrutura durante o carregamento e em outra parte da estrutura durante o descarregamento. Repetidos ciclos de carga causam deformações progressivas que acarretam tensões acima do limite de resistência do material.
- v) A falha ocorre quando há deformações plásticas - fadiga de baixo ciclo, isto é, quando as tensões de trabalho excedem o limite de escoamento do material.

Os mecanismos de falha apresentados acima foram utilizados por MORGAN para estudar o comportamento estrutural do pistão sob a influência de vários fatores tais como: refrigeração do pistão por diferentes tipos de jato de óleo, espessura da cabeça, forma e posição da galeria de refrigeração, diferentes materiais, raios na borda da câmara de combustão e dos diferentes regimes de operação do motor.

A linha de trabalho desenvolvida por ROHLER [3] foi semelhante à de MORGAN. ROHLER analisou o comportamento à fadiga de pistões sob carregamento térmico cíclico de forma bastante detalhada reproduzindo este comportamento em laboratório através de aquecimentos e resfriamentos sucessivos da cabeça do pistão.

Contrariando a tendência mundial dos fabricantes de pistões em reforçar a borda da câmara com novos materiais ou tratamentos superficiais, ADAMS [4] sugeriu a utilização de um material com propriedades mecânicas inferiores às do material do pistão, mas com

um elevado coeficiente de condutividade térmica a fim de modificar o gradiente de temperaturas, propiciando assim, uma diminuição nos níveis de tensões. A influência nas tensões tangenciais, principal responsável pela falha, foi confirmada através de análises numéricas com auxílio do Método de Elementos Finitos. ADAMS entretanto, não comprovou suas teses experimentalmente.

MUNRO [5] e SPENGLER [6] propuseram a utilização de um anel de fibra cerâmica impregnada pela própria liga de alumínio do pistão via "Squeeze Casting", que é um processo de fundição sob pressão. O inserto de fibra cerâmica atua como reforço estrutural da borda da câmara, pois possui melhores propriedades mecânicas à temperaturas elevadas quando comparado ao material tradicional.

O estudo de SPENGLER limitou-se a caracterizar vários materiais com potencial para esta aplicação, enquanto MUNRO realizou ensaios experimentais em motor utilizando pistões com as características mencionadas acima, demonstrando que as trincas normalmente presentes em um determinado tipo de pistão de alumínio são evitadas com a utilização de um anel de reforço de fibra cerâmica na borda da câmara de combustão.

DUNOMOTO et all [7] sugeriram um reforço de fibra cerâmica para a borda de câmara que atinge também a canaleta do primeiro anel de compressão. Testes em motor mostraram, no entanto, níveis não aceitáveis de desgaste nas faces do anel em contato com a canaleta.

A elevação do primeiro anel de compressão está relacionada também ao objetivo de se reduzir os níveis de emissão de poluentes, uma vez que a elevação do anel diminui o volume morto delimitado pelo pistão, pelo cilindro e pelo anel de compressão, ou seja, diminui o volume de um compartimento onde não ocorre uma boa combustão. A elevação do primeiro anel de compressão também aumenta a temperatura de operação do mesmo, ocasionando um desgaste excessi

vo da canaleta e um alto risco de agarramento do anel. Apesar de pouca quantidade de fibra cerâmica presente nas faces da canaleta, esta foi suficiente para desgastar excessivamente o anel de compressão.

GOSSARD [8] trabalhou com uma liga à base de Al-Ni-Cu-Mn aderida ao topo do pistão por difusão. Conseguiu bons resultados em testes com motor e afirmou ser este um processo economicamente viável.

1.3. Escopo do Trabalho

O objetivo deste trabalho é propor, discutir, e exemplificar um procedimento para a especificação e avaliação de materiais para reforço estrutural de pistões.

Após a breve introdução ao problema, feita neste capítulo I, o capítulo II apresenta o procedimento proposto para a caracterização do reforço estrutural do pistão, que consiste basicamente da introdução na borda da câmara de um anel de material poroso impregnado pelo mesmo material do pistão no instante de sua conformação. Os critérios para a escolha dos materiais de reforço estrutural e o levantamento de suas propriedades físicas e mecânicas são discutidos.

A seguir, no capítulo III, o procedimento proposto é utilizado com bons resultados no desenvolvimento de um pistão para um motor ciclo diesel multicilindro, onde as solicitações termo-mecânicas são significativas e responsáveis por trincas na borda da câmara de combustão.

Finalmente, no capítulo IV são apresentadas as conclusões deste estudo assim como recomendações para estudos futuros.

2 - PROCEDIMENTO PROPOSTO PARA A ESPECIFICAÇÃO DE MATERIAIS DE REFORÇO

2.1 Considerações Gerais

O levantamento bibliográfico feito no capítulo anterior indica que uma alternativa viável para se reforçar a borda da câmara de combustão de um pistão é a introdução de um anel de reforço nesta região e que este seja constituído de um material com propriedades mecânicas melhores que as do alumínio na temperatura de operação ou ainda com propriedades físicas tais que modifiquem beneficemente o estado de tensões na região crítica.

A estimativa das tensões devido às solicitações termo-mecânicas em pistões é bastante trabalhosa conforme veremos nos capítulos seguintes. Todavia, algumas boas ferramentas existem e podem ser utilizadas para prever-se o comportamento estrutural do pistão com diferentes tipos de insertos e avaliar o potencial de cada um deles.

O procedimento proposto para a especificação da geometria e do material de um inserto divide-se em cinco etapas apresentadas no item 2.2.

2.2 Procedimento

1ª Etapa: Pré-seleção dos Materiais

A seleção dos materiais para reforço estrutural deve levar em consideração os seguintes fatores:

- i) Estágio atual da tecnologia de manufatura e processos de fa-

- bricação disponíveis visando soluções factíveis;
- ii) Facilidade de fixação do inserto no pistão, garantindo a eficiência da ligação mecânica entre as partes e boa condutividade térmica inclusive na interface;
 - iii) Boas propriedades mecânicas em temperaturas de operação próximas a 350 °C que é o valor normalmente encontrado na borda da câmara de combustão dos pistões de alumínio modernos;
 - iv) Coeficiente de expansão térmica linear menor que o da liga de Alumínio para garantir a presença de tensões residuais compressivas na borda da câmara e na interface inserto-pistão. Desta forma, favorece-se a ligação mecânica inserto-pistão e atenuam-se as tensões trativas alternadas devido à carga do gás, com as tensões médias compressivas oriundas da diferença entre os coeficientes de dilatação. Este assunto é discutido com detalhes no Capítulo 3;
 - v) Boa resistência ao choque térmico e ao impacto para evitar trincas durante a fabricação do pistão, quando pressupõe-se a existência de esforços dinâmicos indesejáveis, ou durante a operação do pistão no motor onde bruscas mudanças de temperatura são frequentes;
 - vi) Elevado coeficiente de condutividade térmica para rápida transferência de calor evitando temperaturas elevadas e diminuindo o gradiente térmico na região próxima à borda da câmara;
 - vii) Baixo peso específico, pois um pistão deve ser o mais leve possível;
 - viii) Boa resistência à corrosão para evitar a formação de óxidos que podem prejudicar a ligação entre o material do inserto e o pistão;
 - ix) Baixo custo e disponibilidade do material para viabilizar comercialmente o produto.

2ª Etapa: Levantamento das Propriedades Físicas e Mecânicas dos Materiais:

As propriedades físicas e mecânicas consideradas importantes para a análise estrutural e os procedimentos para a obtenção de cada uma delas são apresentadas a seguir:

- i) Limite de resistência à tração - É utilizado para a determinação e otimização da composição básica do material do inserto (i.e. porcentagem de material de reforço presente no inserto). O procedimento para obtenção do limite da resistência à tração é normalizado pela ASTM E 8-85, [13]. Caso o material seja frágil e não possibilite o ensaio de tração, utiliza-se o ensaio de flexão com apoio em quatro pontos conforme norma ASTM F-417-75T, [14].
- ii) Limite de resistência à compressão - Sua determinação é necessária uma vez que para determinados materiais surgem, durante o processo de solidificação do pistão no molde, elevadas tensões compressivas no inserto. O procedimento utilizado para sua obtenção consiste basicamente em submeter a compressão dos corpos de prova cilíndricos com uma relação de 2:1 entre seu comprimento L e seu diâmetro D, ($L/D = 2$). Entre as duas faces planas e a máquina de ensaio deve ser posicionado um filme de PTFE para neutralizar o efeito do atrito. Os resultados encontrados são apenas orientativos já que o ensaio não é normalizado.
- iii) Módulo de elasticidade - Propriedade necessária para a análise de tensões tanto numérica como experimental. Pode ser obtida através de ensaios de flexão em quatro pontos normalizado pela ASTM F-417-75T [14], ou ensaios de tração e compres-

são.

- iv) Condutividade térmica - Propriedade necessária para o cálculo da distribuição de temperaturas no pistão. Pode ser estimada considerando-se a porcentagem em volume de cada material constituinte do inserto se os mesmos estiverem distribuídos uniformemente, ou obtida experimentalmente.
- v) Coeficiente de expansão térmica linear - Propriedade utiliza-da para se verificar a influência do inserto nas tensões residuais e nas tensões devido ao gradiente térmico. Pode ser obtida experimentalmente em dilatômetros.

3ª Etapa: Avaliação Estrutural Preliminar do Pistão

Uma importante ferramenta de auxílio para a otimização da confi-guração do inserto é o Método dos Elementos Finitos, MEF. Com sua utilização é possível prever-se as temperaturas de trabalho do pis-tão e particularmente do inserto, bem como as tensões atuantes quer sejam as decorrentes do gradiente térmico-tensões térmicas, da carga do gás - tensões mecânicas, ou as decorrentes da diferença en-tre os coeficientes da dilatação dos materiais - tensões residuais. Existe no entanto, duas grandes dificuldades na utilização do MEF, que são:

- i) Obtenção das condições de contorno, quer sejam térmicas ou mecanicas; e
- ii) Análise de tensões quando estas excedem o limite elástico do material. Estes problemas serão abordados no capítulo seguinte.

A estimativa de distribuição de temperaturas e de tensões térmi

cas pode ser obtida com bons resultados através de uma análise bidimensional com o Método dos Elementos Finitos. Já a obtenção das tensões residuais e mecânicas exige uma análise tridimensional que requer um tempo considerável para a construção da malha de elementos finitos e posterior processamento. Se o pistão em estudo existir fisicamente as tensões residuais e mecânicas podem ser obtidas experimentalmente com auxílio de extensômetros elétricos com relativa facilidade.

Por serem de difícil obtenção, os valores referentes à resistência a fadiga dos materiais de reforço não são levantados a priori, portanto os valores máximos de tensão encontrados com os diferentes tipos de insertos devem ser comparados ao limite de escoamento do material na temperatura de trabalho.

4ª Etapa: Avaliação Preliminar em Motor Monocilíndrico

Os possíveis tipos de falhas em pistões, discutidos no item 1.2 do capítulo 1, isto é: falhas por fadiga de alto ciclo, falhas em decorrência do relaxamento das tensões compressivas, falhas devido ao aparecimento de tensões residuais, falhas devido às deformações progressivas e falhas por fadiga de baixo ciclo, são de difícil análise, pois a predominância de qualquer um dos mecanismos varia conforme o tipo do pistão e do motor. A avaliação preliminar dos vários insertos existentes em um pequeno motor monocilíndrico é recomendada, pois diminui a possibilidade de ocorrência de falhas indesejáveis e talvez catastróficas em motores mais sofisticados onde se deseja a solução definitiva do problema de ocorrência de trincas na borda da câmara de combustão.

5ª Etapa: Avaliação Final do Inserto no Motor de Interesse

Nesta fase do desenvolvimento, a 3ª Etapa do procedimento, ou seja, a análise estrutural do pistão, deve ser aplicada para o pistão do motor de interesse com a utilização dos materiais de reforço estrutural que apresentaram melhores resultados na avaliação preliminar em motor monocilíndrico (4ª Etapa), e testados no motor de interesse, conforme as condições estabelecidas pelo seu fabricante.

3 - APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO

3.1 Introdução

O objetivo deste capítulo é o de aplicar e discutir o procedimento proposto no desenvolvimento do pistão para um motor Ciclo Diesel com 6,6 litros de deslocamento volumétrico, 6 cilindros com diâmetro 112 mm dispostos em linha, injeção direta de combustível na câmara de combustão, alimentação de ar através de um turbocompressor, e que desenvolve a potência máxima de 200 KW à 2200 rotações por minuto.

O pistão deste motor possui uma câmara de combustão tipo reentrante desenvolvida para atender os níveis aceitáveis de emissão de poluentes especificados pelos órgãos de proteção do meio ambiente, [1]. Testes em motor, demonstram que pistões de alumínio não resistem às solicitações mencionadas, apresentando trincas na borda da câmara após algumas centenas de horas de operação, enquanto o procedimento para aprovação exige no mínimo 2000 horas, sem qualquer falha estrutural no pistão.

3.2 Pré-Seleção dos Materiais (1ª Etapa)

De acordo com o apresentado no item 2.2, foram pré-selecionados três materiais para atuarem como reforço estrutural do pistão, os materiais são os seguintes:

- i) Aço-inoxidável sinterizado [9] infiltrado pela liga Al-Si M1-124R [10], também conhecido pelas iniciais de sua denominação em inglês - MRM - Metal Reinforced Material. A porcentagem de aço sinterizado presente no inserto de MRM foi defini-

- da de tal forma a permitir os mais elevados valores de resistência a tração com 100% de suas porosidades interconectadas;
- ii) Cerâmica porosa à base de Alumina (Al_2O_3) [11], sinterizada, e infiltrada pela liga ML-124R. Também conhecida por CMR - Ceramic Reinforced Material. A utilização de menores porcentagens de cerâmica é desejável para se elevar a ductilidade do CRM, no entanto, esta é limitada pela impossibilidade de ocorrer sinterização abaixo de certos valores de densidade de compactação do pó cerâmico;
 - iii) Fibra cerâmica à base de Alumina-Silica, [11], composta de fibras dispostas aleatoriamente em planos paralelos ao do topo do pistão e infiltrada pela liga ML-124R. Também conhecida por FRM - Fiber Reinforced Material.

Estes três materiais são sinterizados com 100% de suas porosidades interconectadas e infiltrados pela liga ML-124R que é uma liga largamente utilizada na fabricação de pistões, através de um processo de fundição sob pressão mais conhecido pela sua denominação em inglês - Squeeze Casting Process. A infiltração do inserto ocorre no mesmo instante em que o pistão é moldado garantindo assim sua fixação mecânica sem vazios na interface que poderiam ser prejudiciais para a transferência de calor durante a operação do pistão no motor.

A utilização do processo Squeeze Casting exige o pré-aquecimento do inserto de reforço antes da infiltração, para garantir o preenchimento completo de suas porosidades pelo alumínio. Durante este pré-aquecimento do inserto, a ocorrência de oxidação deve ser evitada para não prejudicar propriedades mecânicas e sua ligação com o restante do pistão. Este cuidado, juntamente com a dificuldade em se trabalhar com o inserto imerso em atmosferas neutras du

rante a fabricação do pistão, limitou consideravelmente a seleção dos materiais metálicos.

3.3 Levantamento das Propriedades dos Materiais (2ª Etapa)

As propriedades físicas e mecânicas da liga ML-124R e os resultados obtidos para o MRM, CRM e FRM foram obtidos conforme os procedimentos apresentados na 2ª etapa do item 2.2 e são apresentadas na tabela 3.1 para duas temperaturas: 20 °C e 300 °C. A análise dos resultados mostra uma nítida vantagem do CRM e FRM com referência à resistência à compressão. A redução da resistência à compressão do CRM de 20 °C a 300 °C é de apenas 12% contra 25% para o FRM, 35% para o MRM e 76% para a liga ML-124R. No entanto, o CRM apresenta o menor coeficiente de expansão térmica, quase a metade do da liga ML-124R, o que deve ocasionar o surgimento de tensões de compressão bastante elevadas no anel de reforço quando comparado aos demais materiais.

Considerando-se que o tamanho do inserto é pequeno, comparativamente ao do pistão, devemos esperar que um pistão submetido à pressão do gás de combustão apresente o mesmo nível de deformação na borda da câmara qualquer que seja o material de reforço utilizado. Desta forma, se compararmos os valores encontrados de módulo de elasticidade dos materiais e considerarmos a Lei de Hooke, que diz ser a tensão proporcional ao produto de deformação pelo módulo de elasticidade, as maiores tensões mecânicas são esperadas no pistão com inserto de CRM, cujo módulo de elasticidade é cerca de duas vezes maior do que o da liga ML-124R. O FRM apresenta vantagens sobre os demais materiais, pois mostra valor próximo ao da liga ML-124R.

Tabela 3.1 Propriedades físicas e mecânicas dos materiais analisados.

		ML-124R	MRM	CRM	FRM
Resistência à tração, MPa	20°C	200	210	230	180 ⁽³⁾
	300°C	60	200	140	-
Resistência à compressão, MPa	20°C	275 ⁽¹⁾	500 ⁽¹⁾	570	630 ⁽³⁾
	300°C	150 ⁽¹⁾	300 ⁽¹⁾	500 ⁽²⁾	370 ⁽³⁾
Módulo de elasticidade, GPa	20°C	80	140	170	100
	300°C	70	-	-	-
Condutividade térmica, W/m ^o K	20°C	155	57	76	119
	300°C	162	-	-	-
Coeficiente de expansão térmica x 10 ⁶ °C ⁻¹	20-100°C	20,0	-	-	-
	20-300°C	22,0	18,1	10,5	19,0

(1) não ocorre ruptura frágil, considerado $\bar{\sigma}_{0,2\%}$

(2) muita dispersão de resultados, min.: 430 MPa, max.: 750 MPa

(3) propriedades com os planos das fibras alinhadas ao eixo de simetria do corpo de prova.

Com relação às tensões devido ao gradiente de temperaturas no pistão-tensões térmicas, o FRM é novamente favorecido por apresentar o valor mais elevado de condutividade térmica dentre os materiais de reforço proposto.

3.4 Avaliação Estrutural Preliminar (3ª Etapa)

3.4.1 Introdução

A análise estrutural preliminar foi desenvolvida considerando-se pistões com 92 mm de diâmetro onde introduziram-se insertos de reforço com os três materiais propostos, isto é: CRM, MRM e FRM.

As condições de operação dos pistões foram consideradas como sendo aquelas induzidas por um pequeno motor ciclo Diesel, monocilíndrico, de injeção indireta, e super alimentado, o qual fornece uma potência de 15,0 KW à 2.400 rotações por minuto. A figura 3.1 apresenta esquematicamente este pistão onde pode ser observada a alteração do topo plano do pistão através da introdução de uma pequena câmara de combustão com 30 mm de diâmetro, centrada em relação à antecâmara no cabeçote do motor e com espessura da borda de apenas 1,0 mm (câmara de combustão tipo "squich lip"). A adoção de uma espessura relativamente pequena tem o objetivo de favorecer o aparecimento de trincas e diminuir o tempo de teste em motor.

A distribuição de temperaturas e de tensões térmicas em regime permanente são calculadas através do Método dos Elementos Finitos. As tensões e deformações de origem mecânica, isto é oriundas da pressão do gás no topo do pistão, podem ser estimadas através da utilização de uma trabalhosa malha tridimensional e um prolongado tempo de processamento. Uma vez que o pistão já existe fisicamente, a medição das deformações mecânicas é realizada em laboratório através de aplicação estática de pressão no topo do pistão, instrumento com extensômetros elétricos.

3.4.2 Distribuição de Temperaturas e de Tensões Térmicas no Pistão

A distribuição de temperaturas e de tensões térmicas na borda da câmara de combustão são obtidas através do método dos elementos finitos que neste estudo utiliza o programa ANSYS [12].

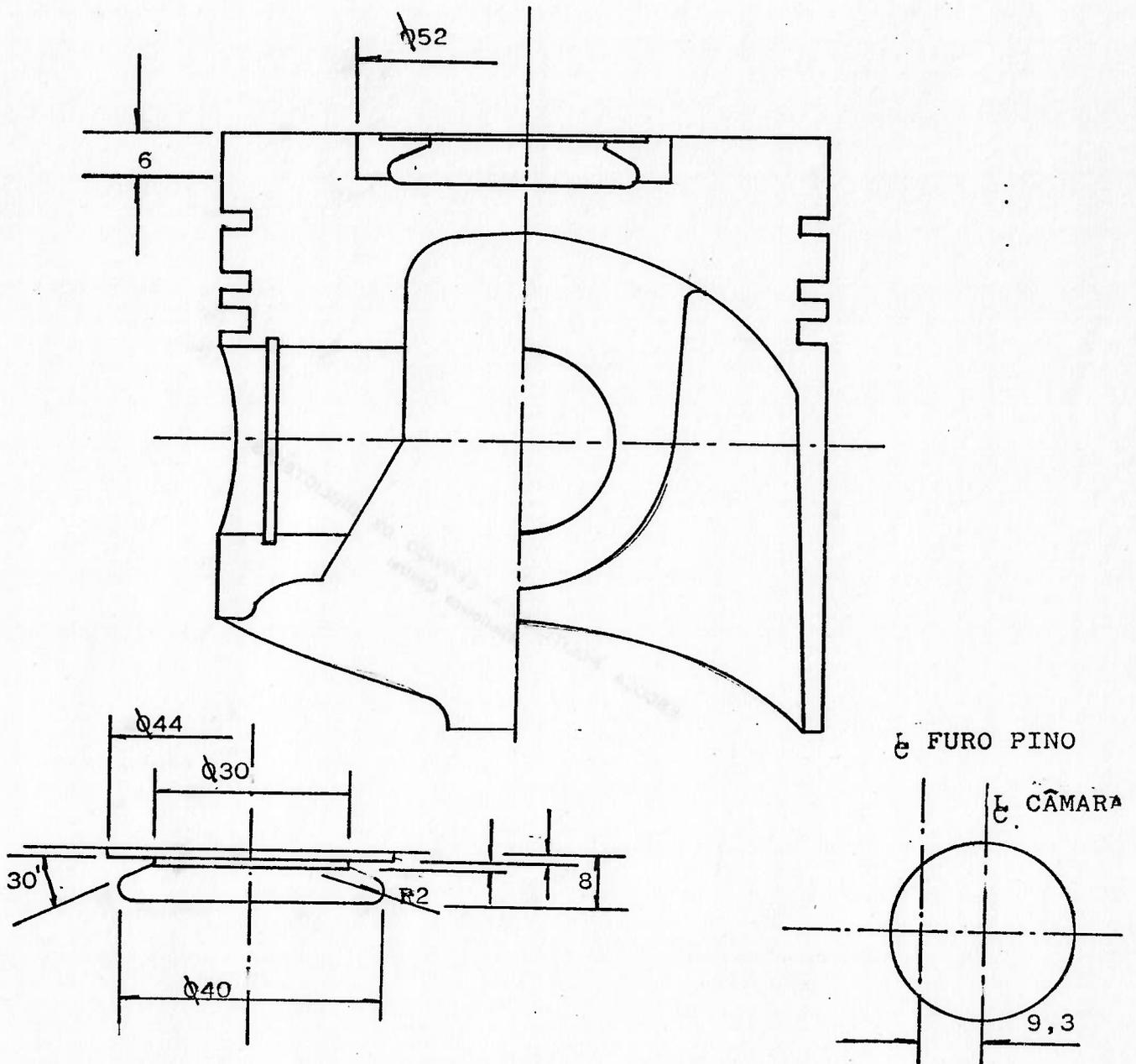


Figura 3.1 Dimensões do inserto e da câmara de combustão no pistão de diâmetro 92 mm.

A malha de elementos finitos utilizada na análise é apresentada na figura 3.2 juntamente com as condições de contorno adotadas para simular máxima sollicitação no motor. A malha contém elementos axissimétricos retangulares com 203 nós perfazendo um total de 406 graus de liberdade e apresenta a câmara de combustão centralizada em relação ao eixo longitudinal do pistão para permitir análise bi dimensional. Em decorrência desta simplificação, a análise apresenta valores médios de temperaturas. Os resultados da análise por elementos finitos são mostrados na tabela 3.2.

As temperaturas no pistão também foram obtidas experimentalmente com o motor operando em condição de potência máxima. A medição das temperaturas é possível com auxílio de pinos térmicos mais conhecidos pela sua denominação comercial, "templugs", e que são instalados no pistão próximo da canaleta do primeiro anel de compressão, na região de apoio do pino, e no topo do pistão próximo à câmara de combustão.

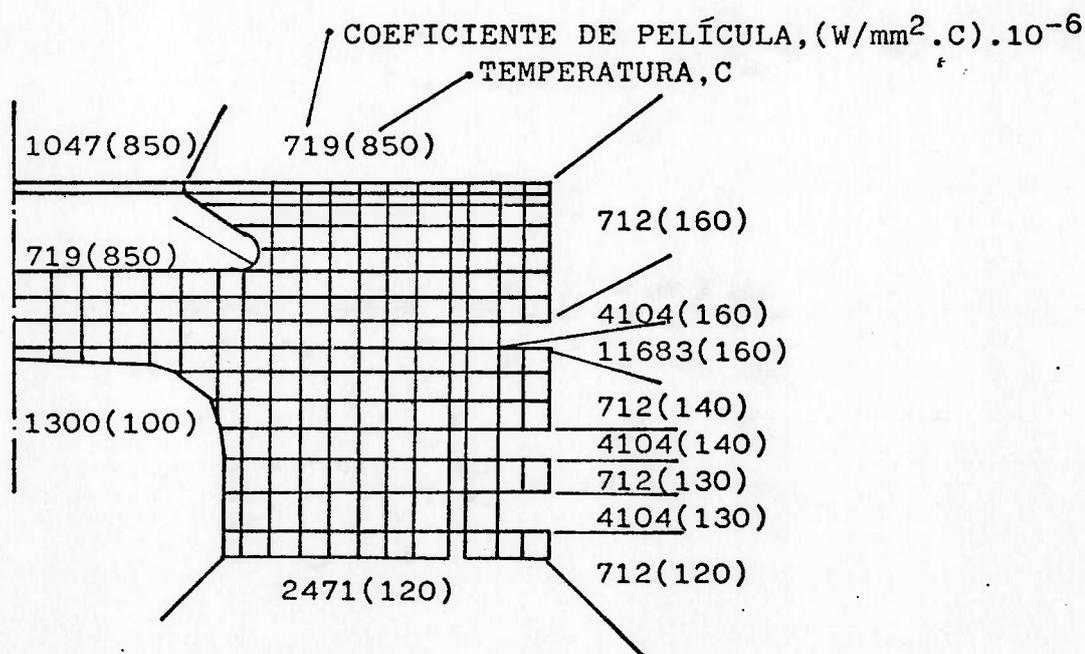
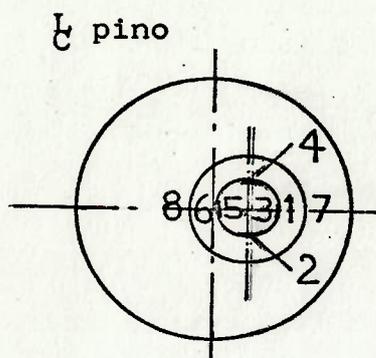


Figura 3.2 Malha de elementos finitos e condições de contorno para pistão de diâmetro 92 mm.

Tabela 3.2 Resumo dos resultados obtidos com o pistão sem inserto e com os vários insertos propostos.



		1	2	3	4	5	6
temperatura elementos finitos, °C	ML-124	331	331	331	331	331	331
	CRM	416	416	416	416	416	416
	MRM	395	395	395	395	395	395
tensões térmicas tangenciais, MPa	ML-124	- 74	- 74	- 74	- 74	- 74	- 74
	CRM	-420	-420	-420	-420	-420	-420
	MRM	-340	-340	-340	-340	-340	-340
tensões mecânicas tangenciais, MPa	Pistão de alumínio	-11,3	+10,0	-12,1	+ 7,8	-13,0	-11,7
	CRM-residual			-11,0			
trincas, em número de horas em motor	ML-124					27	
	CRM	360 hs sem trincas					
	MRM					200	
	FRM	1000 hs sem trincas					

Os templugos são pequenos parafusos fabricados com um metal que sofre sensíveis e bem conhecidas variações de dureza residual com a temperatura. A medida da dureza do templug após o teste do pistão em motor em que são mantidos as mesmas condições de ensaio durante uma hora indica, quando comparada com a curva de calibração do material, a temperatura da região em que este foi instalado. As

dimensões de duas diferentes configurações de templugs são apresentados na figura 3.3. A figura 3.4 indica a localização destes templugs e as temperaturas obtidas em um pistão de alumínio sem reforço na borda de câmara. Estas temperaturas medidas foram comparadas às estimadas pelo método dos elementos finitos e apresentam valores semelhantes confirmando a validade das condições de contorno adotadas.

As tensões térmicas resultantes do gradiente de temperaturas, estimadas através do MEF, são também apresentadas na tabela 3.2, onde se pode observar que as tensões térmicas tangenciais são compressivas e mais elevada no pistão com inserto de CRM. As temperaturas e tensões térmicas no inserto de FRM não são calculadas, pois seu coeficiente de expansão térmica, módulo de elasticidade e coeficiente de transmissão de calor são semelhantes aos do alumínio.

As tensões residuais tangenciais na borda da câmara decorrentes da solidificação da liga e da presença do inserto de reforço são consideradas na análise através do Método dos Elementos Finitos. Considera-se na análise que tanto o pistão como o inserto estão a 580 °C que é a temperatura de início de solidificação da liga ML-124R e que a esta temperatura ambos estão isentos de tensões. O programa de elementos finitos utilizado considera contudo apenas deformações elásticas dos materiais, a correção do erro a esta limitação é feita através da medição das tensões residuais em laboratório com auxílio de extensômetros de resistência elétrica. Os extensômetros são instalados ao longo da borda da câmara de combustão, direção tangencial conforme mostra a figura 3.5. A seguir, corta-se o pistão de tal forma que cada região próxima a um extensômetro fique isolada do restante da estrutura. O valor da tensão residual é então obtida pela diferença de leitura antes e após o corte do pistão. O valor de tensão residual encontrado no pistão

com reforço de CRM é apresentado na tabela 3.2.

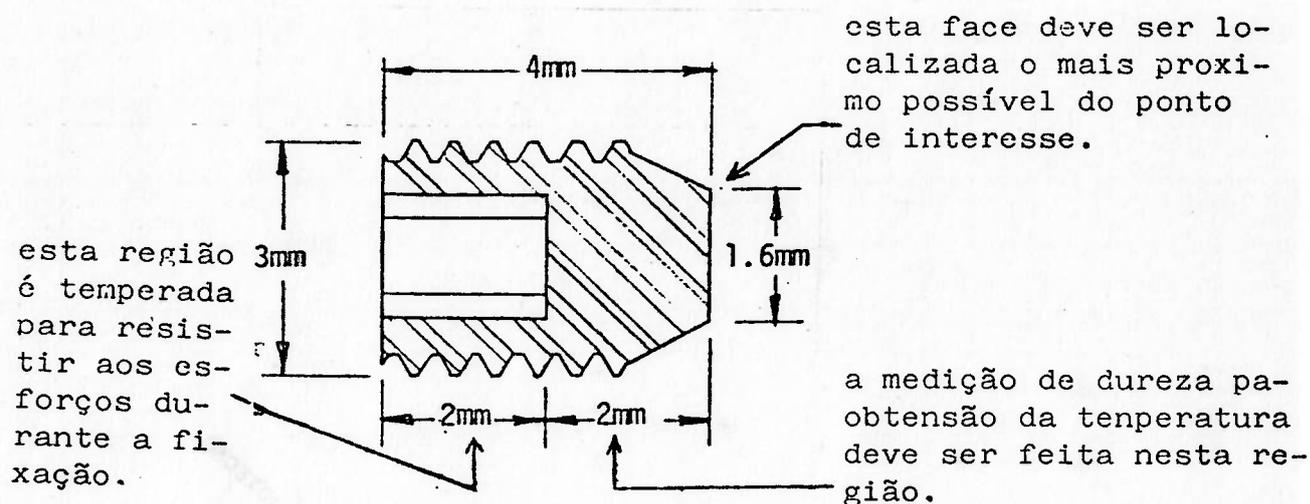


Figura 3.3a Dimensões do templug M3, que pode ser utilizado sem a destruição posterior do pistão testado.

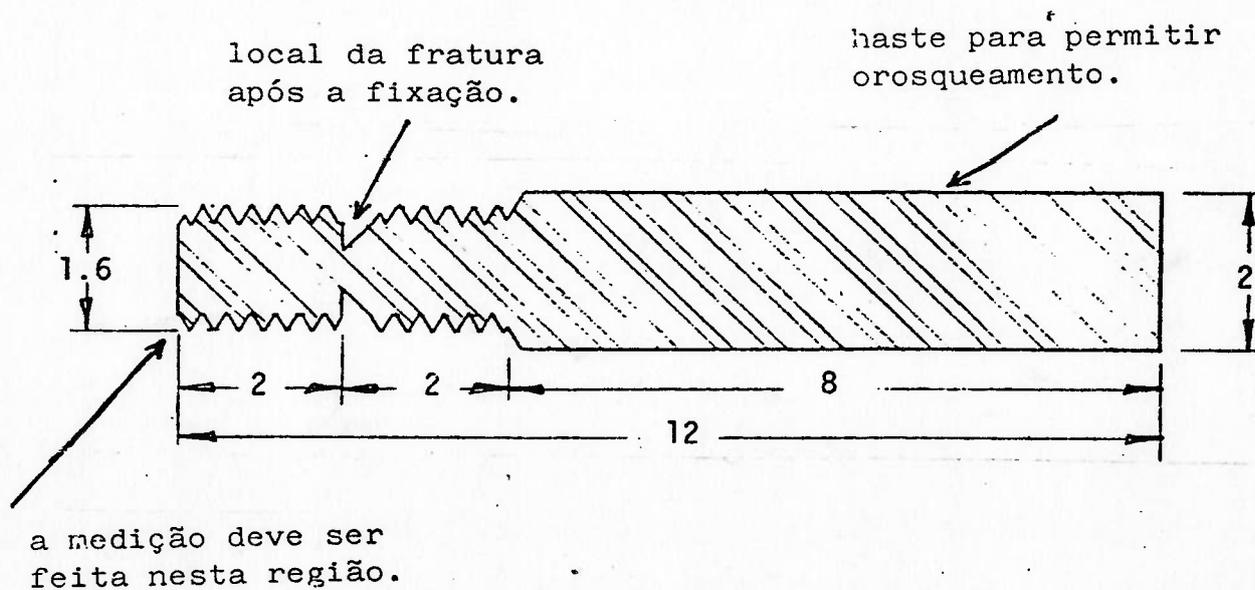
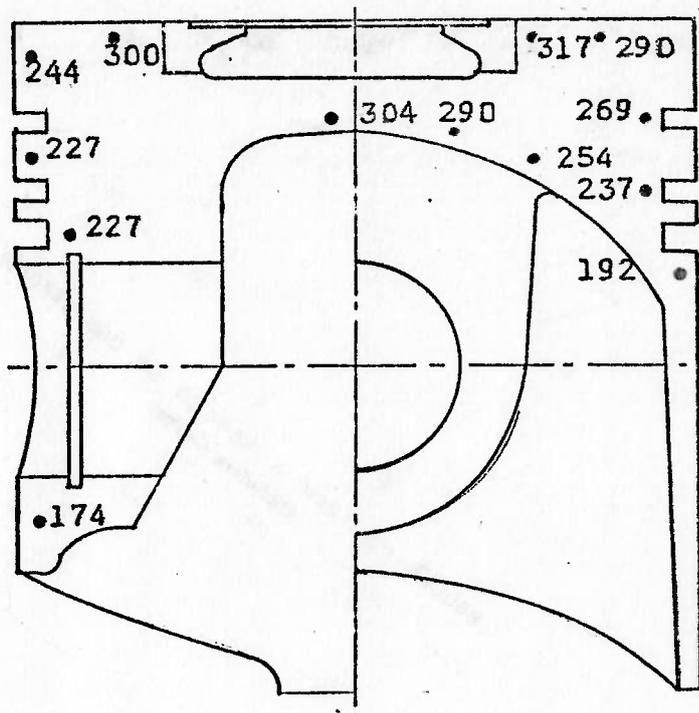


Figura 3.3b Dimensões do templug M1.6, que exige a destruição do pistão testado para sua retirada.

lado da válvula
de escape.

lado de pressão.



NOTA- O débito de combustível foi mantido constante em 37mg/inj.

Figura 3.4 Temperaturas obtidas com auxílio de "templugs" M1.6 com o pistão operando em um motor fornecendo uma potência de 8,6 KW a 2400 rpm. (°C)

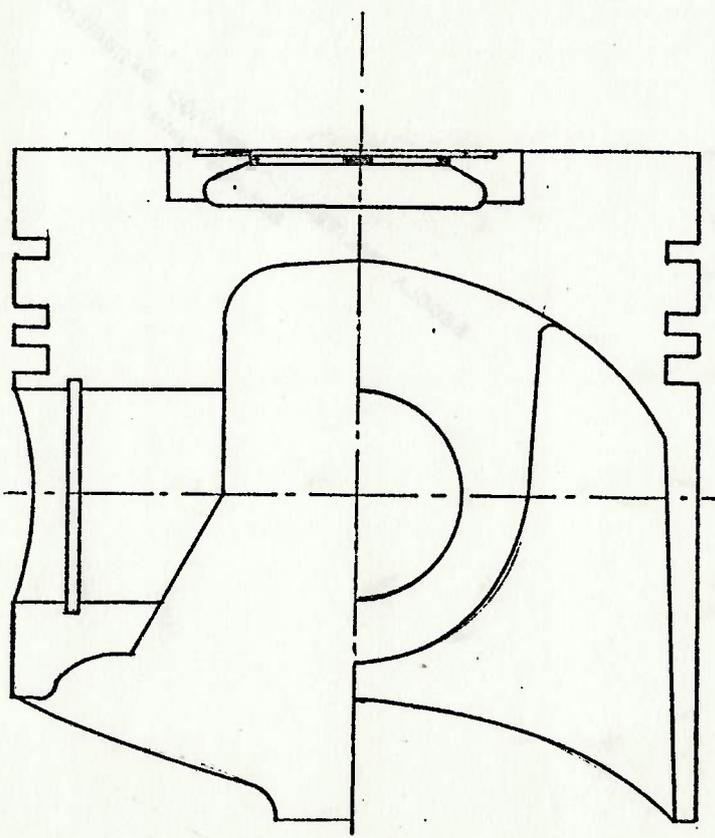
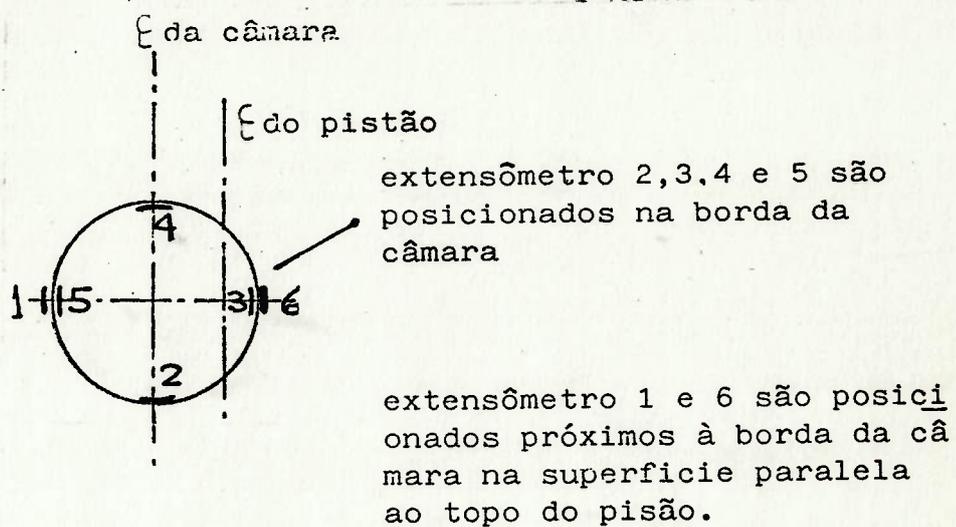


Figura 3.5 Localização dos extensômetros elétricos utilizados na determinação das deformações sob carregamento mecânico e das tensões residuais.

3.4.3 Estimativa das Tensões Mecânicas na Borda da Câmara

As tensões de origem mecânica na região do reforço decorrentes da pressão do gás sobre o topo do pistão são obtidas experimentalmente. Utiliza-se para tanto, extensômetros posicionados na borda da câmara conforme mostra a Figura 3.5. A aplicação da pressão no topo do pistão, simulando a que ocorre no motor em funcionamento, é conseguida através de um sistema hidráulico que utiliza óleo como fluido e permite aplicação de pressões até 28 MPa. Anéis de polipropileno em substituição aos do motor permitem a vedação na câmara de teste.

A figura 3.6 apresenta a configuração do ensaio. A pressão aplicada durante a medição das tensões é de 9,5 MPa que é a máxima pressão de combustão atingida no motor operando em condições de torque máximo. Os valores obtidos são também mostrados na tabela 3.2 onde podemos verificar que se encontram dentro dos limites de resistência dos materiais de reforço analisados.

3.5 Avaliação Preliminar em Motor Monocilíndrico (4ª Etapa)

Os testes são realizados com o motor em dinamômetro operando a plena carga. A potência máxima é mantida constante ao longo do teste em 14,7 KW a 2400 rpm e os intervalos para desmontagem e inspeção do pistão são variáveis em função da resistência do material do inserto. A inspeção é visual com auxílio de um estereoscópio.

O pistão de alumínio utilizado como referência, apresenta trincas após 27 horas de teste. Os resultados das demais versões são mostrados na tabela 3.2.

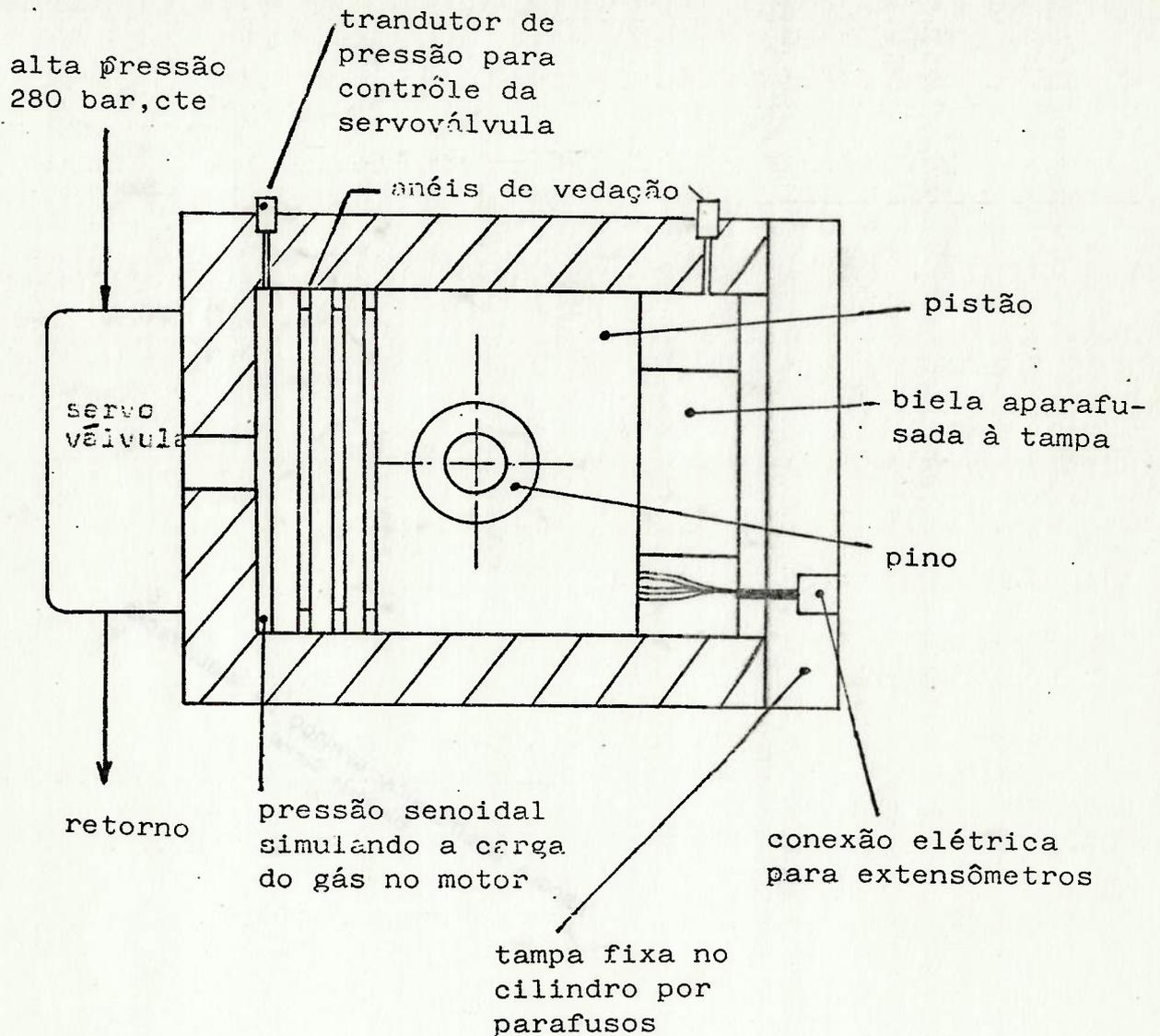


Figura 3.6 Ilustração da câmara de testes dinâmicos do pulsador hidráulico.

A análise metalográfica dos insertos após o teste não mostra alterações na estrutura do CRM e FRM. O inserto da MRM, no entanto, apresentou a formação acentuada de compostos intermediários frágeis em decorrência da elevada temperatura na borda da câmara de combustão deste pistão devido à incidência direta da frente de chama vindo da antecâmara, figura 3.7.

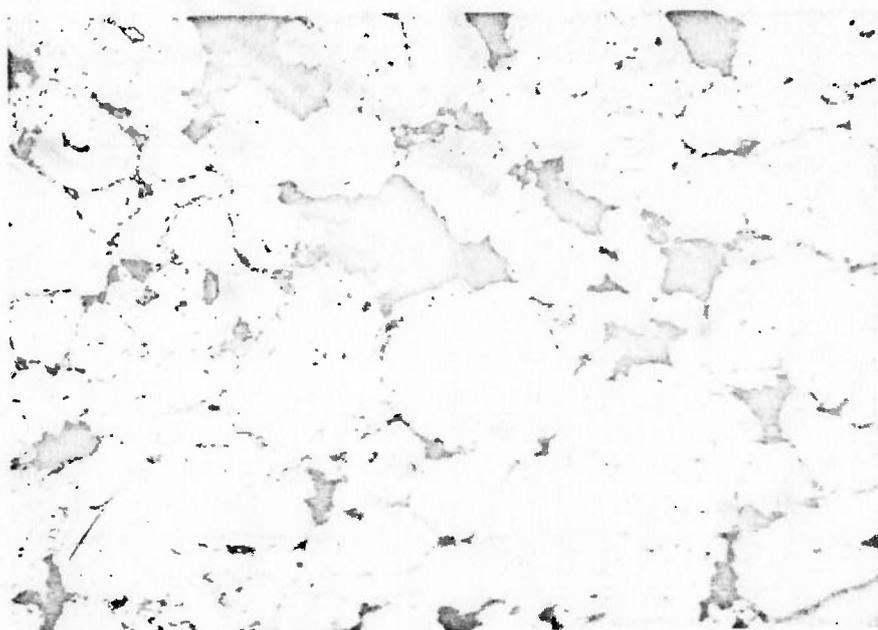
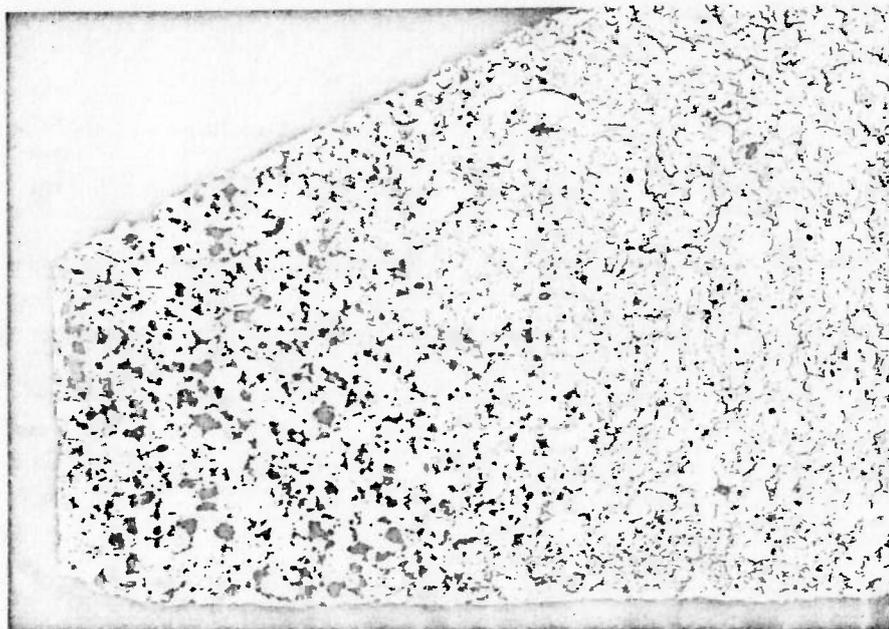


Figura 3.7 Estrutura do MRM após 129 horas de teste em motor (55X), o detalhe mostra a presença de compostos intermetálicos Al-Fe (480X).

3.6 Avaliação Final do Inserto no Motor de Interesse (5ª Etapa)

3.6.1 Introdução

O pistão que será utilizado no motor de interesse tem uma câmara de combustão reentrante, figura 3.8, com canto vivo na borda e atende o nível de emissões de poluentes permitido. Testes em motor no entanto, revelam que com essa geometria, trincas se desenvolvem na borda da câmara de combustão na direção do pino com aproximadamente 550 horas de teste cíclico. Nesta etapa do desenvolvimento será definida a geometria e o material do inserto de reforço para este pistão.

3.6.2 Definição da Geometria do Inserto

Para a determinação de distribuição de temperaturas e de tensões térmicas e mecânicas neste pistão foram utilizados os mesmos procedimentos do capítulo anterior.

As tensões tangenciais e tensões equivalentes na borda da câmara de combustão devido ao gradiente de temperaturas calculado conforme figura 3.9, com várias configurações de inserto são apresentadas na figura 3.10.

As tensões mecânicas na borda da câmara medidas com auxílio de extensômetros elétricos posicionados na direção do pino e na direção de pressão, são mostradas na figura 3.11, onde o valor de tensão trativa máxima encontrada é da ordem de 60 MPa. Para garantir a presença de tensões tangenciais compressivas no inserto durante todo o ciclo de operação do motor, a configuração deste deve ser tal que a soma das tensões térmicas e residuais sejam compressivas, e superiores a 60 MPa. Portanto, a tensão de compressão devi

do ao gradiente térmico deve-se situar entre o mínimo de 60 MPa e a máxima tensão de compressão que o material suporta nas condições de operação do motor, considerando um fator de segurança de 1.3 que resulta 385 MPa para o CRM, 231 MPa para o MRM e 285 MPa para o FRM.

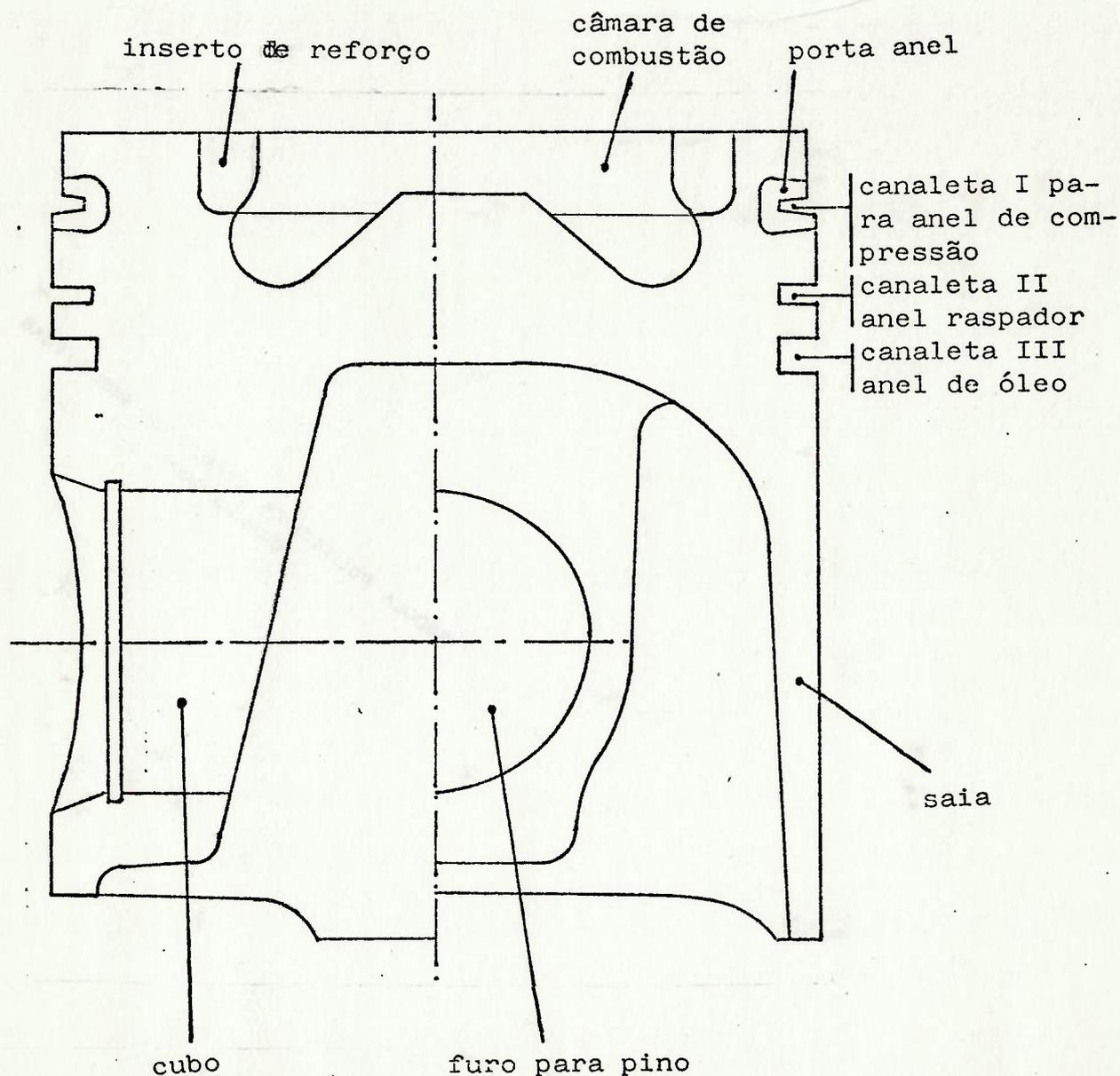


Figura 3.8 Configuração do pistão e da câmara de combustão reentrante para atender o nível de emissões aceitável para 1991. Diâmetro do pistão: 112 mm.

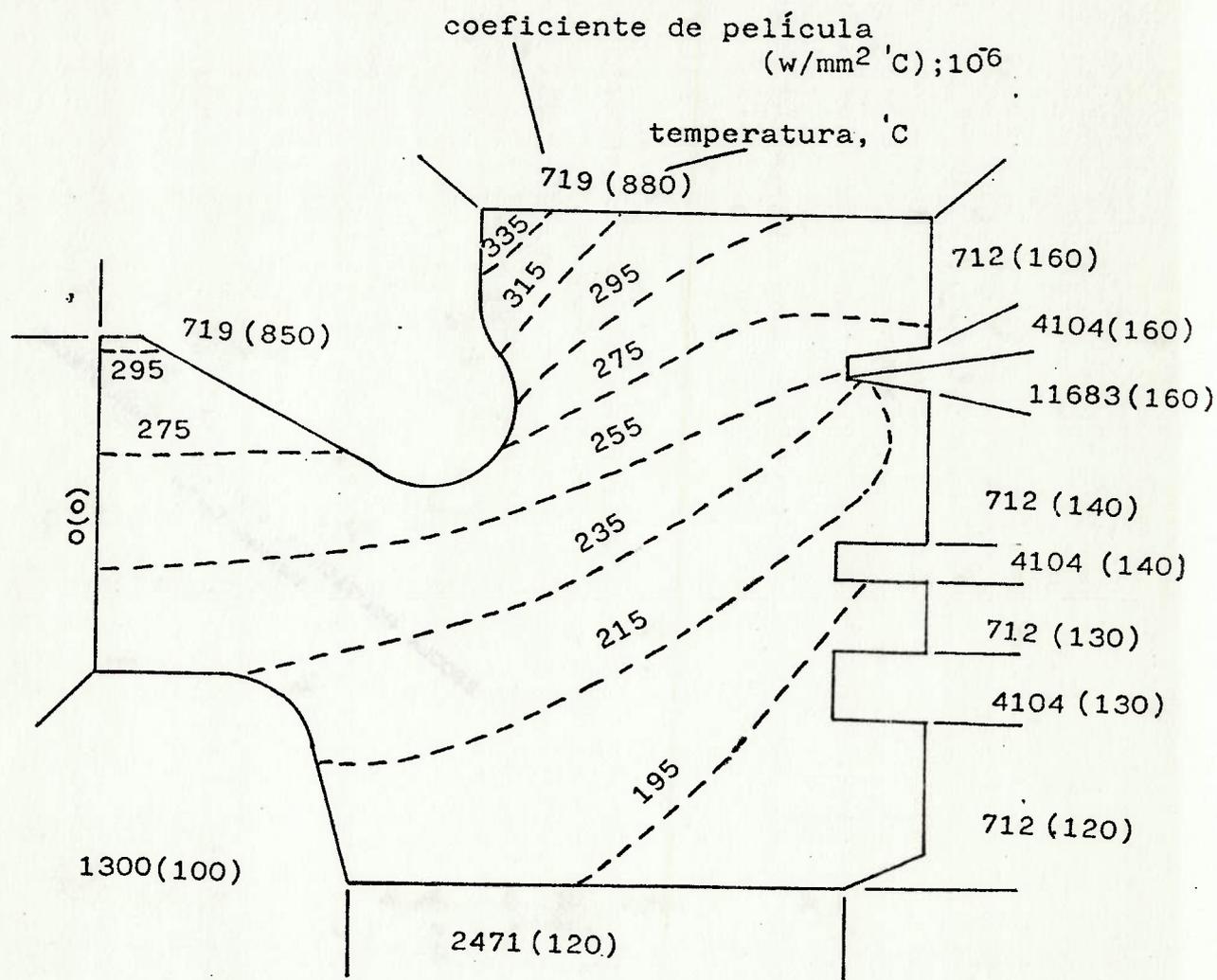
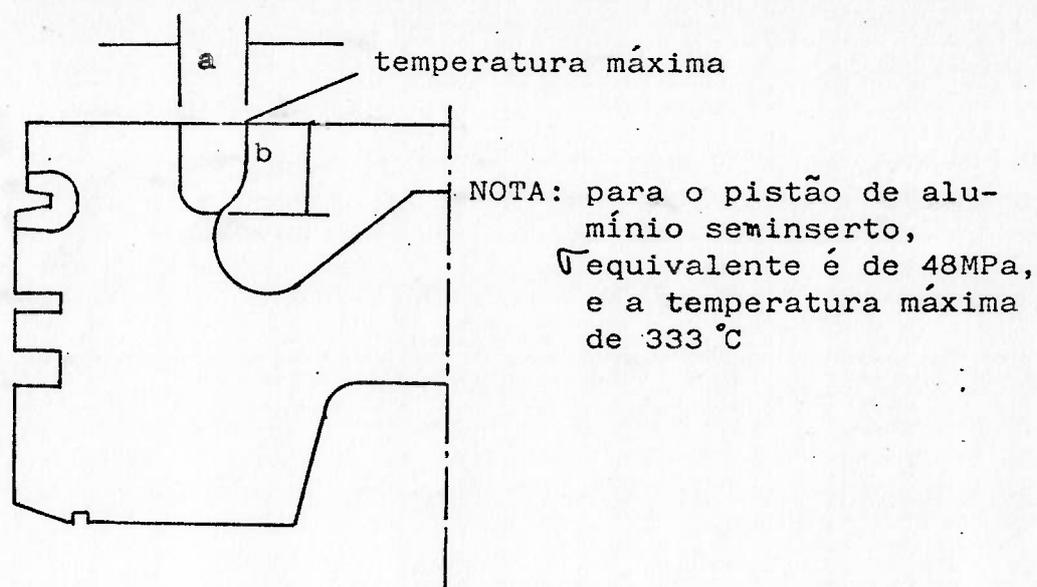


Figura 3.9 Condições de contorno e distribuição de temperaturas obtidas com auxílio de elementos finitos 2D.



Dimensão		Inserto de MRM			Inserto de CRM		
a	b	$\sigma_{\text{equivalentes}}$	$\sigma_{\text{tangenciais}}$	temperatura	$\sigma_{\text{equivalentes}}$	$\sigma_{\text{tangenciais}}$	temperatura
mm		MPa	MPa	'C	MPa	MPa	'C
2	2	145	-170	335	610	-710	334
5	4	140	-170	351	550	-650	354
5	2	160	-170	345	649	-690	348
14	4	150	-180	354	547	-610	358
5	10	137	-160	359	430	-490	365
9	7	160	-170	364	460	-480	371
2	6	140	-150	344	567	-620	346
+	2	157	-170	347	582	-630	350
+	4	144	-170	353	452	-600	359

Figura 3.10 Tensões térmicas tangenciais e equivalentes na borda da câmara de combustão com várias configurações de inserto de MRM e CRM, calculadas através do método de elementos finitos.

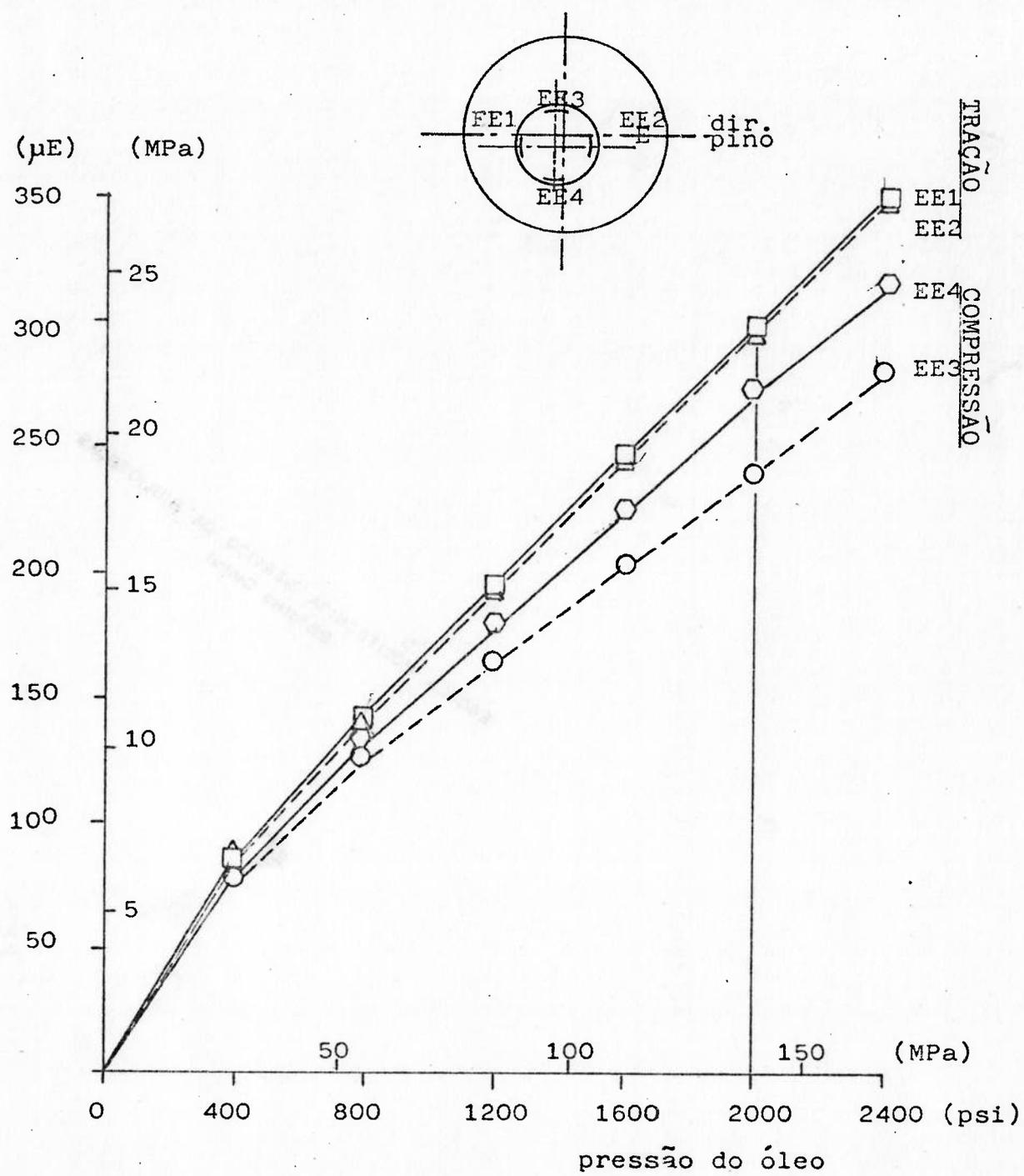
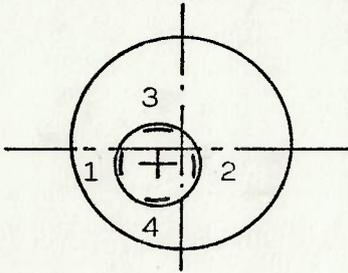


Figura 3.11 Tensões mecânicas na borda da câmara devido a carga do gás.

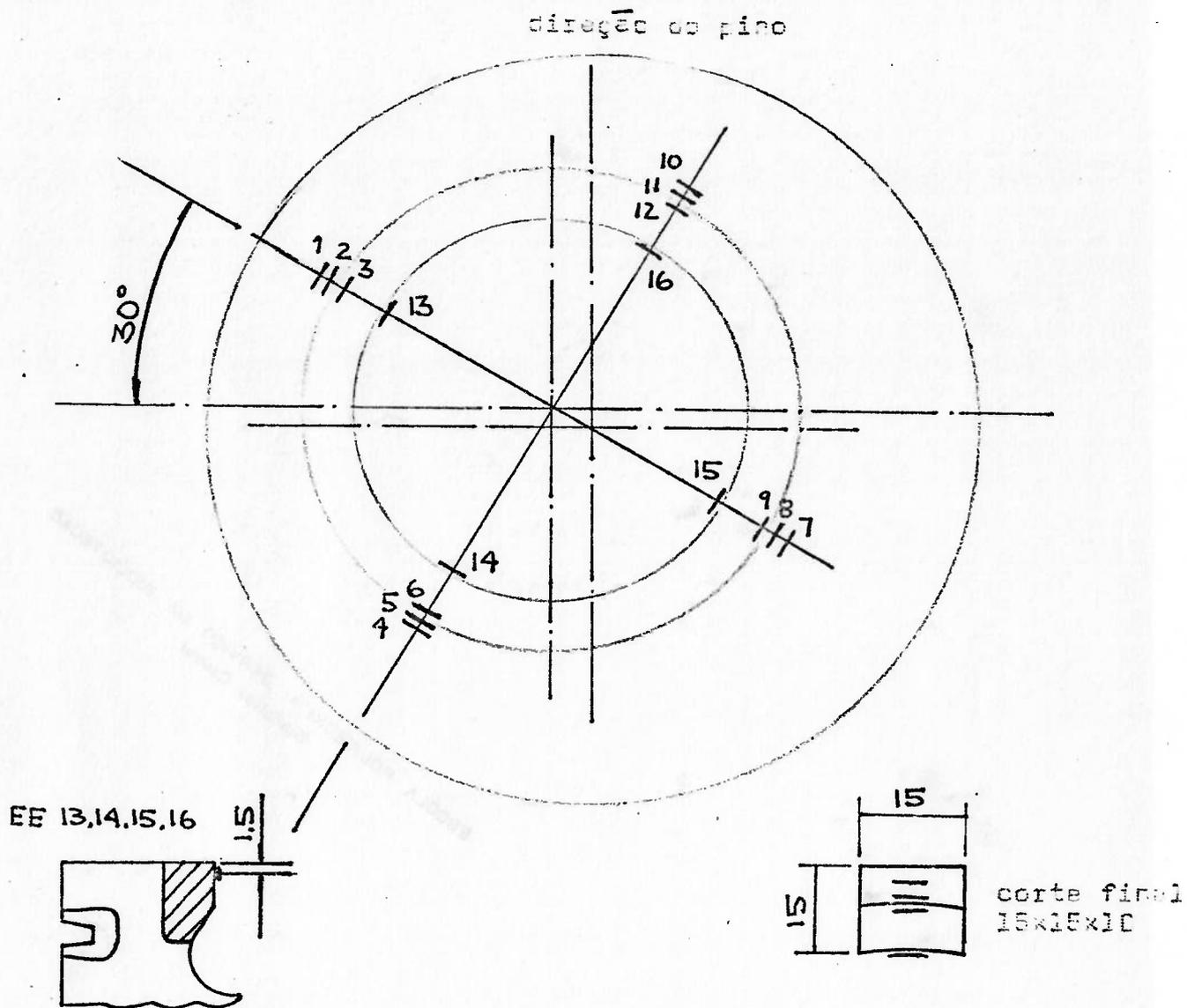
A análise dos resultados não mostra diferenças significativas entre as várias configurações de insertos, mas a definição de sua geometria deve também considerar as tolerâncias envolvidas no processo de manufatura e o espaço disponível para a passagem de liga líquida durante o vazamento. A tabela 3.3 mostra as tensões calculadas e medidas para um inserto de CRM com as dimensões escolhidas: diâmetro externo de 72 mm e altura de 16 mm.

Para a obtenção das tensões residuais no inserto, extensômetros elétricos são posicionados próximos à interface inserto/alumínio como mostra a figura 3.12. A diferença entre as tensões medidas antes e após o corte e o consequente alívio de tensões, resulta no valor aproximado da tensão residual. Os valores encontrados são inferiores aos calculados através de elementos finitos 2D. Isto pode ser explicado pelo fato de que a análise não considera a deformação plástica da liga de alumínio durante a solidificação e/ou resfriamento. As propriedades físicas e mecânicas da liga nestas condições ainda não são conhecidas. Os valores calculados, figura 3.10 servem portanto apenas para comparações qualitativas entre as várias configurações.

Tabela 3.3 Tensões tangenciais calculadas e medidas na borda da câmara.



	EE1		EE2		EE3		EE4	
	Al	CRM	Al	CRM	Al	CRM	Al	CRM
Tensões mecânicas tangenciais medidas, MPa	28	50	30	50	- 19	- 40	- 21	- 46
Tensões residuais medidas, MPa		-308		-314		-286		-265
Temperaturas calculadas elementos finitos 2D, °C	351	368	351	365	351	368	351	368
Tensões térmicas tangenciais. EF2D, MPa	- 58	-513	- 58	-513	- 58	-513	- 58	-513
Tensões residuais calculadas. EF2D, MPa	4	-874	4	-874	4	-874	4	-874



EE	1	2	3	4	5	6	7	8	
σ_T	+35	+117	-5	-70	+8	-17	+21	+4	MPa
EE	9	10	11	12	13	14	15	16	
σ_T	-117	+28	+9	-13	-69	-74	-83	-71	MPa

Figura 3.12 Tensões tangenciais residuais em um pistão com inserto de CRM.

3.6.3 Avaliação da Resistência Estrutural em Motor

O roteiro de teste utilizado para a verificação da resistência estrutural destes pistões é fornecido pelo fabricante do motor e estabelece que este deve operar durante 55 minutos a plena carga, potência máxima, temperatura de água de refrigeração entre 88 °C e 93 °C, e a seguir, durante 5 minutos, trabalhar em marcha lenta com a temperatura da água em torno de 38 °C, retornando então à condição anterior. O avanço da bomba injetora em ambos os casos é de 26 °C antes do ponto morto superior.

A aplicação cíclica de carga tem por objetivo expor o pistão às tensões térmicas transientes conforme discutido no capítulo 2. Pistões com insertos de diferentes materiais foram testados simultaneamente e os intervalos de parada do motor para inspeção ocorreram a cada 100 horas. As peças que apresentaram trincas ao longo do teste foram sendo substituídas por peças novas permitindo assim a avaliação de todos os materiais de reforço propostos.

O aparecimento de três pequenas trincas no pistão de alumínio sem reforço estrutural foi verificado entre 430 hs e 550 hs de teste. As três pequenas trincas com extensão de aproximadamente 2,0 mm se localizam a 60° da direção do pino, próximo a região mais estreita da câmara e também a mais quente conforme mostra a figura 3.13a. As trincas tipicamente de origem térmica, devido as suas formas e posições, são mostradas em detalhes na figura 3.13b.

Os pistões com reforço de MRM não apresentaram trincas após 520 hs de teste quando este foi finalizado. A análise metalográfica do inserto também não revelou qualquer anormalidade. Os resultados insatisfatórios para o inserto de MRM utilizado no pistão do capítulo anterior deveu-se às características do motor de injeção indireta que superaquece a borda da câmara modificando prejudi-

cialmente a estrutura do material na região. O motor 6.6L no entanto injeta combustível no fundo na câmara diminuindo a temperatura na borda conforme mostra a figura 3.14.

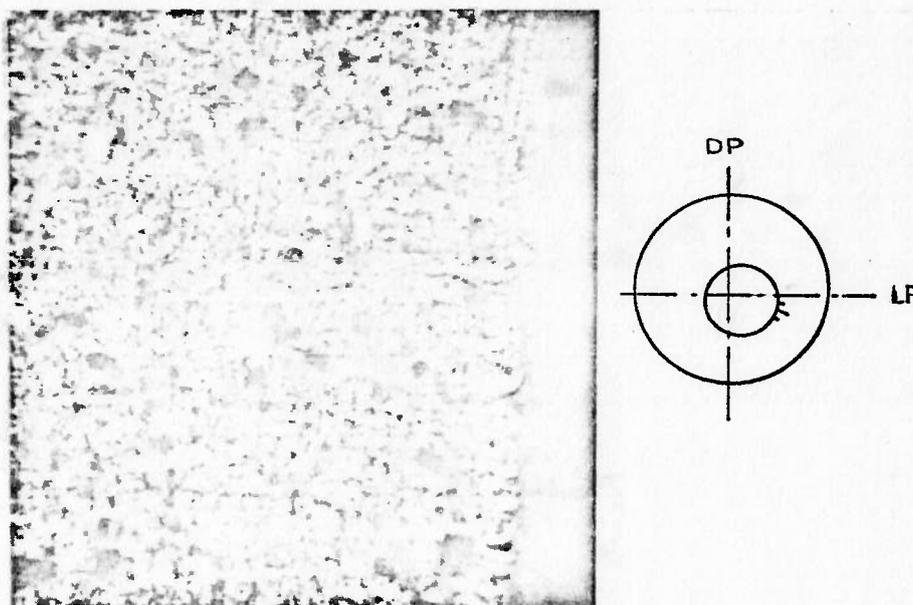


Figura 3.13a Detalhe da trinca maior (64X).

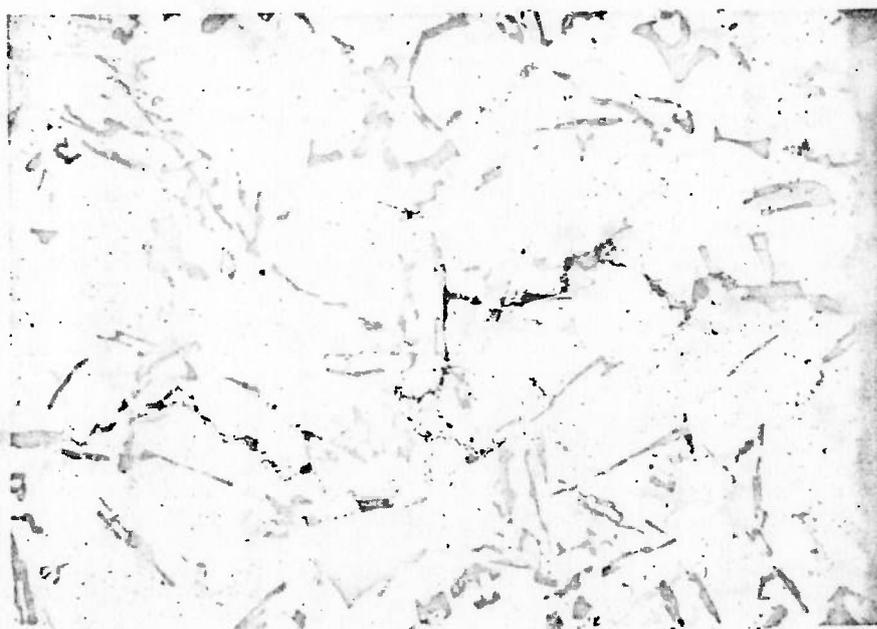
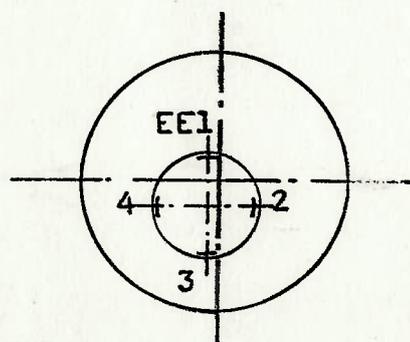


Figura 3.13b Metalografia de uma das trincas do pistão de alumínio sem inserto verificada entre 430 e 550 hs de teste em motor (295X).

O pistão com reforço de CRM apresentou trincas entre 550 e 1063 hs de teste em motor conforme figura 3.15. A análise visual mostra uma trinca que se abre a medida em que se afasta da borda da câmara e tem abertura máxima na interface inserto/alumínio. O padrão de trinca é anormal quando comparado as trincas habituais que apresentam maior abertura próximo a borda da câmara. Nota-se também uma protuberância devido ao escoamento do alumínio próximo à trinca indicando elevadas tensões de compressão neste material.

As tensões residuais medidas no inserto de CRM de um pistão novo, mostradas na tabela 3.3, foram comparadas com tensões residuais de um pistão testado 502 horas em motor, e que não apresentou trincas. Os resultados mostrados na tabela 3.4 indicam uma redução de 12% na tensão residual circunferencial devido ao relaxamento dos materiais, inserto e liga de alumínio, durante operação no motor, sugerindo a ocorrência de fluência. Outra forte indicação de ocorrência de fluência pode ser vista na figura 3.16, onde o perfil do topo do pistão mostra uma elevação de até 0,070 mm na borda da câmara semelhante em forma, a um vulcão.

Tabela 3.4 Resultados de tensões residuais medidas em pistões com inserto de CRM após 502 hs de teste em motor em um pistão semelhante sem uso.



	EE1	EE2	EE3	EE4
Pistão novo, μe	-1778	-1555	-1726	-1537
Pistão testado, μe	-1298	-1473	-1510	-1494
Redução porcentual	27	5	15	3

NOTA: Nas condições de marcha lenta, durante os cinco minutos, as temperaturas nos pontos assinalados não excedem 112 °C.

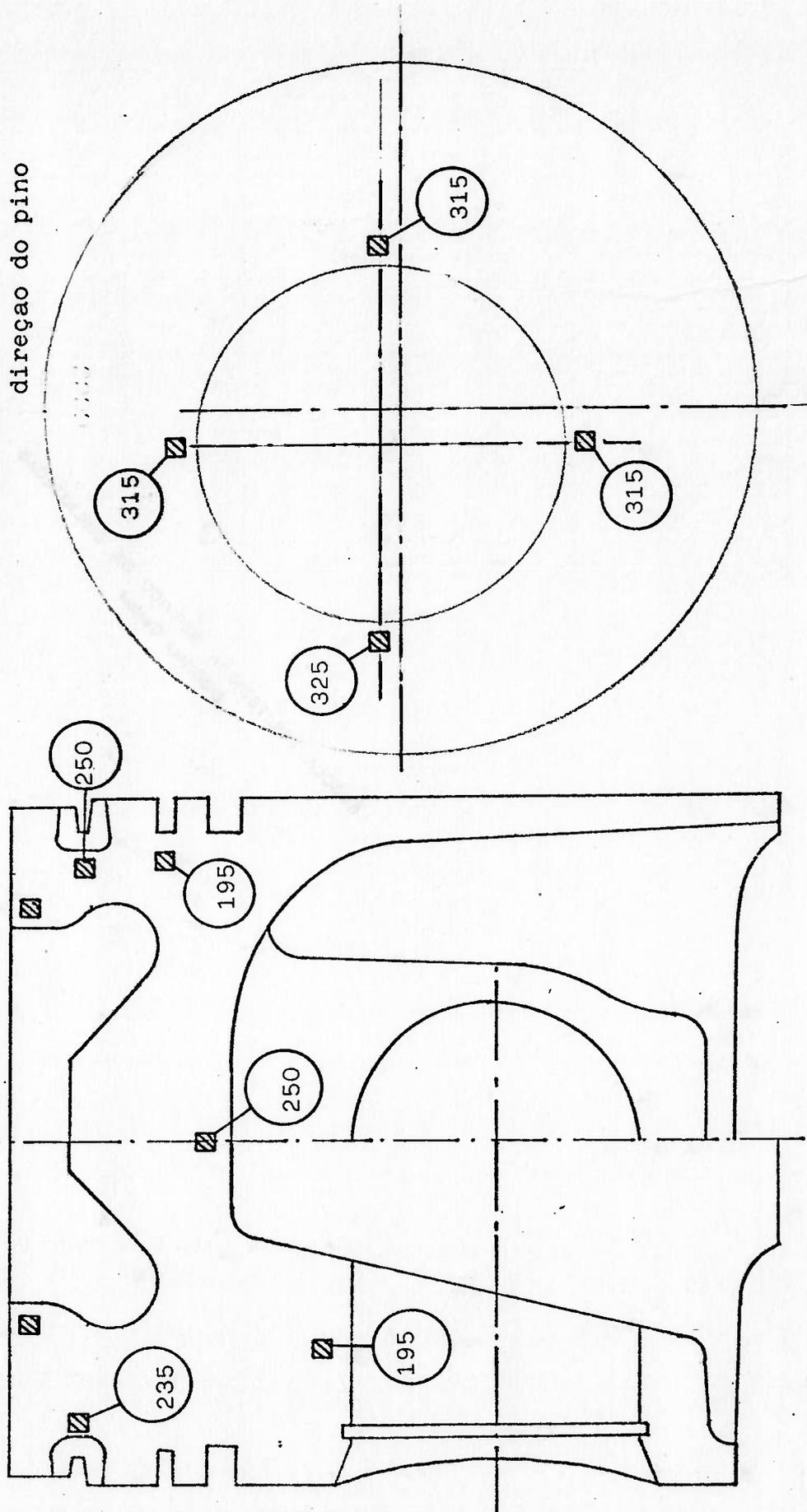


Figura 3.14 Distribuição de temperaturas no pistão na condição de potência máxima durante os 55 minutos. Obtidos com auxílio de templogs M3.

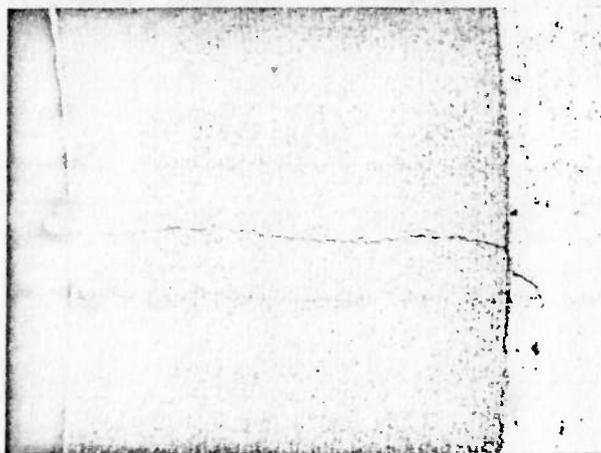


Figura 3.15a Trinca no inserto de CRM após 1063 hs de teste em motor (10X).

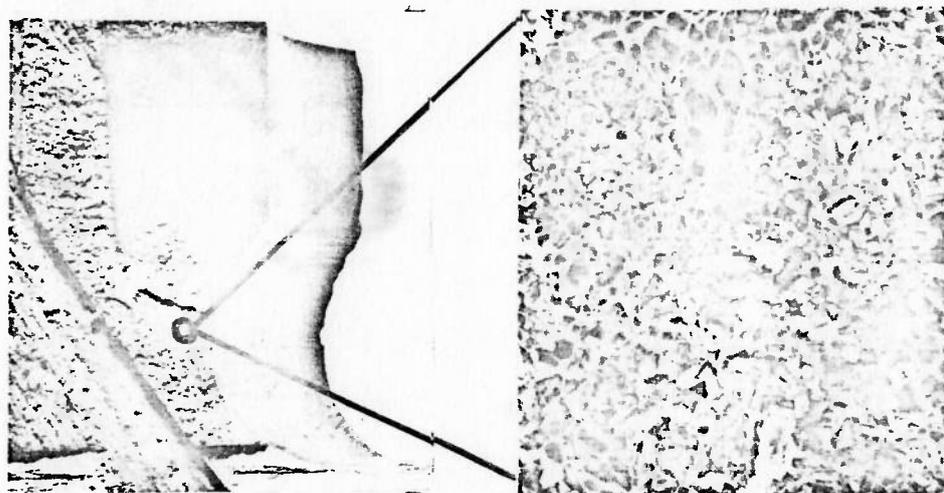


Figura 3.15b Detalhe da trinca no inserto do CRM (MEV 450X).

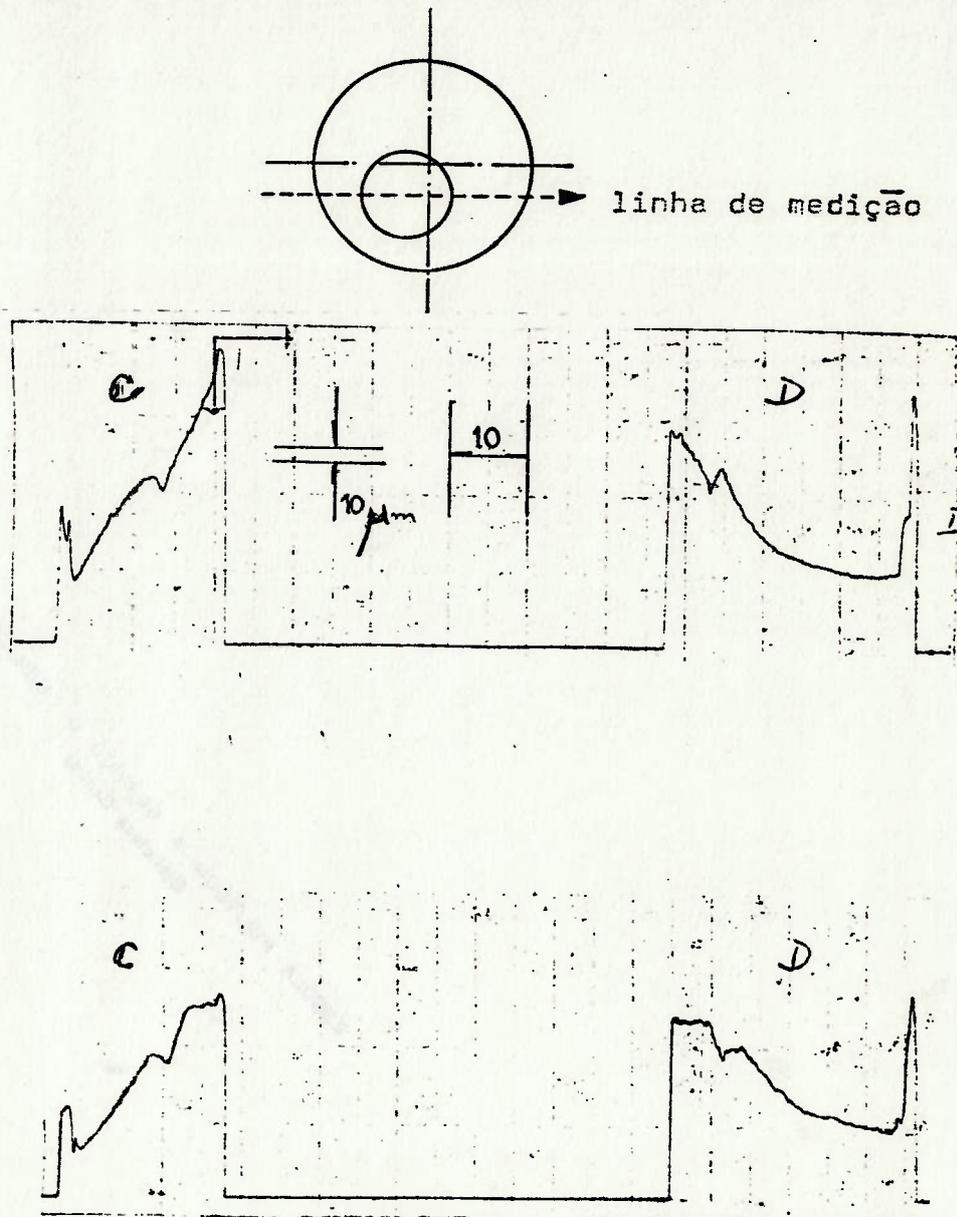


Figura 3.16 Alinhamento do topo do pistão após 2000 hs de teste em motor. A figura superior refere-se ao inserto de FRM e a inferior ao de CRM.

A deformação assimétrica do alumínio tracionado pelo inserto devido a descentralização da câmara em relação ao eixo do pistão pode ter provocado o aparecimento de tensões trativas da região do inserto próximo a interface, o que explica a maior abertura da

trinca neste ponto e a mesma localização em todos os pistões trincados.

O pistão com reforço de FRM não apresentou trincas após 2000 hs de teste, quando este foi finalizado. A figura 3.16 mostra também para o FRM elevadas deformações na borda da câmara semelhantes ao do pistão com CRM. A maior ductilidade do FRM no entanto favorece o não aparecimento de trincas.

A tabela 3.5 apresenta um resumo dos resultados de testes em motor com todas as versões avaliadas.

Tabela 3.5 Resumo dos resultados de testes em motor com procedimentos de teste 55/5. Pistão de diâmetro 112 mm.

Pistão de alumínio sem reforço	Pistão com reforço de CRM	Pistão com reforço de MRM	Pistão com reforço de FRM
1 pistão com 3 trincas na direção de pressão 430 e 550hs	1 pistão sem trincas com 2000 hs	1 pistão com 502 hs sem trincas	2 pistões sem trincas com 2000 hs
1 pistão sem trincas com 550 hs	1 pistão com trincas radiais entre 550 e 1063 hs		

4 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

4.1 Conclusões

Neste trabalho é proposto um procedimento para a especificação de materiais de reforço estrutural de borda de câmara de combustão de pistões de alumínio. A utilização deste procedimento no desenvolvimento de um pistão para um motor diesel que fornece uma potência de 200 kW apresentou excelentes resultados. De todos os materiais testados para atuar como reforço estrutural da borda da câmara de combustão desse pistão, o que apresentou melhor comportamento foi o inserto de FRM. Os testes cíclicos de 2000 hs em motor apresentou excelentes resultados sem o aparecimento de trincas ou degeneração do inserto enquanto o pistão de alumínio sem reforço mostra trincas sob mesmas condições de teste entre 430 hs e 550hs.

Pistões com inserto de MRM mostram-se bastante sensíveis às temperaturas de operação no motor e podem apresentar trincas devido a modificações na estrutura metalúrgica do material.

Os pistões com inserto de CRM apresentam trincas com aproximadamente 550 hs de teste em motor. Adicionalmente a este mau resultado, a usinagem do material cerâmico é bastante trabalhosa e ocasiona desgaste precoce das ferramentas de corte utilizadas. Um acabamento posterior em retífica é necessário para melhorar o acabamento superficial, encarecendo consideravelmente o produto.

4.2 Recomendações

A viabilidade do CRM pode ser efetivada com auxílio de análises pelo método de elementos finitos verificando-se a influência de diferentes configurações de inserto na distribuição de tensões. A

geometria do inserto poderia então ser otimizada quer seja pelas dimensões ou pela descentragem do eixo do inserto em relação ao eixo da câmara de combustão.

Uma das dificuldades encontradas neste trabalho é a não disponibilidade das propriedades físicas e mecânicas da liga de alumínio durante a solidificação, o que impede a consideração das deformações plásticas na análise via elementos finitos. Faz-se necessário portanto um trabalho específico para suprir esta necessidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CARTELLIERI, W.P., WACHTER, W.F. Status report on a preliminary survey of strategies to meet US-1991, HD Diesel emissions standards. (Apresentado ao International Congress and Exposition SAE, Detroit, 1987).
- [2] MORGAN, W.J. Finite element predictive techniques applied to crown cracking problems in medium speed diesel engines. (Apresentado ao the 1979 Motorsympo, s. l., 1979).
- [3] ROHLER, Manfred. Rissneigung von Leichtmetallkolbenlegierungen durch periodische Wärmebeanspruchung. Motor technische Zeitschrift, 30(12):472-79, dez. 1969.
- [4] ADAMS, W.R. Use of analytical techniques in diesel engine piston design. 24p. (Apresentado ao 139 Congress International des Machines a Combustion, Vienna, 1979).
- [5] MUNRO, Robert. The performance improvement of aluminum alloy diesel engine pistons by squeeze casting. Warrendale, SAE, 1986, 18p. (Apresentado ao International Congress and Exposition, Detroit, 1986). Nr. 860161.
- [6] SPENGLER, William G. & YOUNG, William B. Techniques to upgrade heavy duty aluminum pistons. Warrendale, SAE, 1986. 19-28p. (Apresentado ao International Congress and Exposition, Detroit, 1986). Nr.: 860162.
- [7] DUNOMOTO, Tadashi et alii. Ceramic fiber reinforced piston for high performance diesel engines. Warrendale, SAE, 1983. 11p. (Apresentado ao International Congress and Exposition, Detroit, 1983). Nr.: 830252.
- [8] GAZZARD, Simon T. Piston crown cracking: finding a new solution. Diesel and Gas Turbine Progress Worldwide, 45(1):30-32, jan. 1979.

- [9] PECKNER, Donald & BERNSTEIN, I.M. Handbook of stainless steels, New York, McGraw-Hill, 1977.
- [10] METAL LEVE S.A. Ind. e Com., Materiais pistões e bronzinas, São Paulo, 1984.
- [11] SHIGEYUKI, Somiya, KANAI, Eizo & Endo, KEM-Ichiro ed. Proceedings of the first International Symposium on Ceramic Components for Engine. Dordvecht, Reidel, 812p. 1984.
- [12] KOUNKE, ANSYS Engineering Analysis System, Theoretical Manual - Rev. 39, EUA 1978.
- [13] ASTM E 8-85 American Society for Testing and Materials. Standard test methods of tension testing of metallic materials. Philadelphia, ASTM, 1988. 16p. (ASTM-E 8).
- [14] ASTM F-417-75T American Society for Testing and Materials. Flexural strength (modulus of rupture) of electronic-grade ceramics. Philadelphia, ASTM, 1978. 4p. (ASTM-F 417).